

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ROZHRANÍ PRO DETEKTOR OPTICKÝCH PULSŮ

INTERFACE FOR OPTICAL PULSE DETECTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Dušek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Filip Dušek

ID: 211545

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Rozhraní pro detektor optických pulsů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Srovnajte vlastnosti lavinových fotodiod a polovodičových fotonásobičů pro detekci slabých optických pulsů s délkou hrany v řádu nanosekund. Při návrhu se zaměřte na minimalizaci vlastního šumu detektoru a chování v režimu přebuzení. Pro zvolenou variantu navrhnete předzesilovač a regulovaný zdroj napájecího napětí, který zajistí optimální pracovní podmínky detektoru v rozsahu teplot -20 st. C až 60 st. C. V případě lavinové fotodiody může napětí dosáhnout až 200V. Zařízení bude v podobě laboratorního přípravku s výstupem 50Ω, u něhož se předpokládá připojení k osciloskopu.

Navrhnete desku plošného spoje a přípravek realizujte. Provedte měření dosažených parametrů, zejména šumu, schopnosti obnovy činnosti po silném přebuzení nebo zapnutí napájení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] CALO, P.P., CICIRIELLO, F., PETRIGNANI, S., MARZOCCA, C. SiPM readout electronics. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 926, 2019, pp. 57-68.

[2] HOROWITZ, P., HILL, W. The Art of Electronics. New York: Cambridge University Press, 2015.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 27.5.2021

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem, realizací a testováním rozhraní pro detektor optických pulsů. Rozhraní se skládá z fotodetektoru, předzesilovače a regulovatelného zdroje.

Napájecí zdroj pro lavinovou fotodiodu zahrnuje experimentální funkci pro automatické nastavení napětí pomocí měření zisku. Fotodetektor je doplněn širokopásmovým zesilovačem se ziskem 19dB.

Klíčová slova

Fotodetektory, lavinová fotodioda, návrh rozhraní pro detektor optických pulsů, regulovatelný zdroj, mikrokontroler, předzesilovač.

Abstract

This bachelor thesis deals with the design, realization, and testing of the interface for the optical pulses detector. The interface consists of 3 parts – the photodetector, the preamplifier, the adjustable source.

Supply source for avalanche photodiode includes experimental function for voltage automatic setting with the help of gain measurement. Photodetector is complemented by a wideband amplifier with gain 19dB.

Keywords

Photodetector, avalanche photodiode, design of the interface for the optical pulses detector, adjustable source, microcontroller, preamplifier.

Bibliografická citace

DUŠEK, Filip. *Rozhraní pro detektor optických pulsů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133582>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Zdeněk Kolka.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Filip Dušek
VUT ID studenta:	211 545
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2020/21
Téma závěrečné práce:	Rozhraní pro detektor optických pulsů

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mě v průběhu studia podporovali, zejména mé rodině a přátelům. Největší poděkování však patří vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zdeňku Kolkovi za odbornou pomoc, jeho věcné připomínky a cenné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne:

podpis autora

Obsah

1. TEORETICKÁ ČÁST	12
1.1 DETEKTORY OPTICKÉHO ZÁŘENÍ	12
1.1.1 Fotodiody	12
1.1.2 Fotonásobiče	13
1.1.3 Důležité parametry	14
1.1.4 Zvolení vhodného fotodetektoru	14
1.1.5 Užití fotodetektorů v praxi	14
1.2 SROVNÁNÍ FOTODETEKTORŮ	15
1.2.1 Kritéria výběru	15
1.2.2 Porovnání	15
1.2.1 Shrnutí	16
1.3 ROZBOR ČÁSTÍ Z NÁVRHU.....	18
1.3.1 Nízko-šumový předzesilovač	19
1.3.2 Regulovatelný zdroj	19
1.3.3 Mikrokontroler	19
2. NÁVRHY SCHÉMAT.....	20
2.1 DESKA ZDROJE A MIKROPROCESORU.....	20
2.1.1 Napájecí část	21
2.1.1 Kalibrační smyčka	23
2.1.2 Funkce mikrokontroleru	23
2.1.3 Zdroj.....	24
2.1.4 Podpůrný obvod	26
2.2 DESKA APD A PŘEDZESILOVAČE.....	26
2.2.1 Napájecí část	28
2.2.2 Fotodetektor	28
2.2.3 Předzesilovač	29
2.2.4 Nízkofrekvenční zesilovač	29
3. PRAKTICKÁ ČÁST.....	31
3.1 NÁVRHY A KONSTRUKCE DPS.....	31
4. ZÁVĚR.....	35

SEZNAM ZKRATEK

APD	Lavinová fotodioda (Avalanche photo diode)
SiPM	Křemíkový fotonásobič (Silicon photo multiplayer)
MCU	Mikrokontroler
LDO	Regulátor s nízkým úbytkem napětí
LNA	Nízkošumový zesilovač
AD	Analogově digitální převodník
DA	Digitálně analogový převodník
DPS	Deska plošných spojů
SMD	Součástky pro povrchovou montáž

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 V-A charakteristika fotodiod [11]	13
Obr. 1.2 Vnitřní zapojení fotonásobiče [5]	13
Obr. 1.3 Celkový šum a odstup signálu od šumu pro APD	17
Obr. 1.4 Celkový šum a odstup signálu od šumu pro PIN	17
Obr. 1.5 Celkový šum a odstup signálu od šumu pro PM	18
Obr. 1.6 Blokové schéma	18
Obr. 2.1 Celkové blokové schéma	20
Obr. 2.2 Blokové schéma desky zdroje a mikroprocesoru	21
Obr. 2.3 Napájecí část	22
Obr. 2.4 Kalibrační smyčka	23
Obr. 2.5 Zapojení MCU	24
Obr. 2.6 Celkové zapojení zdroje	24
Obr. 2.7 Schéma zapojení odporů	25
Obr. 2.8 Zapojení vybíjecího obvodu	26
Obr. 2.9 Blokové schéma APD a předzesilovače	27
Obr. 2.10 LDO na vstupní desce	28
Obr. 2.11 Zapojení APD	29
Obr. 2.12 Zapojení předzesilovače	29
Obr. 2.13 Schéma nízkofrekvenčního zesilovače	30
Obr. 3.1 Osazená deska APD a předzesilovače	31
Obr. 3.2 Osazená deska MCU a zdroje	32
Obr. 3.3 Konfigurace MCU v programu CUBE	32
Obr. 3.4 Výpis hlavní části smyčky v main() část 1	32
Obr. 3.5 Výpis hlavní části smyčky v main() část 2	33
Obr. 3.6 Výpis hlavní části smyčky v main() část 3	33
Obr. 3.7 Výpis hlavní části smyčky v main() část 4	33
Obr. 3.8 Výpis hlavní části smyčky v main() část 5	34

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Rešerše fotodetektorů	15
Tabulka 2 Faktor přebytečného šumu pro různé struktury	16
Tabulka 3 Rešerše předzesilovačů	28

Úvod

Tato práce se zabývá srovnáním vlastností PIN fotodiody, lavinové fotodiody a fotonásobiče. Cílem práce bylo navrhnout rozhraní pro detektor optických pulsů, který je schopen přijímat slabé optické pulsy v řádu nanosekund. Při návrhu bylo nutné se zaměřit na minimalizaci vlastního šumu detektoru a chování v režimu přebuzení. Pro zvolenou variantu fotodetektoru byl navržen předzesilovač a regulovaný zdroj napájecího napětí, který zajistí optimální pracovní podmínky pro fotodetektor.

Práce je rozdělena do několika kapitol, kde se daná problematika řeší. Kapitola Teoretická část je věnována rozboru fotodetektorů (PIN, APD a SiPM), rozboru důležitých součástí, které se nacházejí v návrzích, a rozboru srovnání fotodetektorů, díky čemuž je možné vyhodnotit nejlepší možnou volbu detektoru pro tuto práci. Další kapitola řeší popis a návrh schémat pro mikrokontroler, regulovatelný zdroj a APD společně s předzesilovačem.

Výstupem této práce je reálný laboratorní přípravek s výstupem $50\ \Omega$, u něhož se předpokládá připojení k osciloskopu. Na realizovaném přípravku bylo provedeno měření dosažených parametrů, zejména šumu a schopnosti obnovy činnosti po silném přebuzení nebo zapnutí napájení.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Detektory optického záření

Jako detektor optického záření můžeme použít fotorezistory, fototranzistory, fotodiody, fotonásobiče a fototyristory. Tato práce se věnuje fotodiodám (PIN a APD) a fotonásobičům (SiPM), u kterých na konci teoretické části bude provedeno srovnání. Toto srovnání detektorů rozhodne o součástce, která bude nejlepší možnou volbou pro detekci slabých optických pulsů s délkou hrany řádů nanosekund.

1.1.1 Fotodiody

Fotodiody jsou polovodičové součástky, kde na PN přechod proniká světlo, to zapříčiní generaci páru elektron–díra v oblasti přechodu PN. Jestliže přechod PN nebude osvětlený, fotodioda se bude chovat jako běžná plošná dioda.

Princip fotodiody PN a PIN spočívá ve vstupujícím fotonu do polovodiče. Jestliže foton má dostatečnou energii, bude absorbován, tím vznikne nový volný elektron a díra. Tyto částice vytvoří v polovodiči napětí, nebo vodivost. U napětí se jedná o fotovoltaiický jev, u vodivosti o fotovodivostní jev.

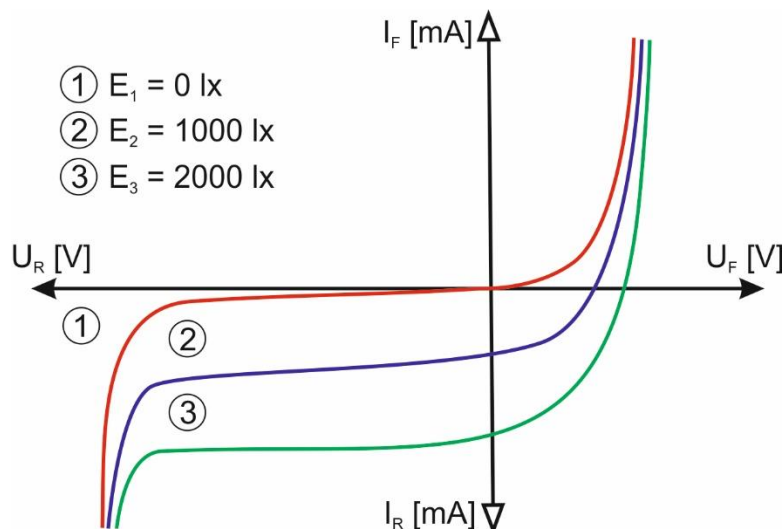
Volt-ampérová charakteristika PN a PIN se dá využít ve třech kvadrantech. IV. kvadrant se nazývá hradlový režim, dioda se chová jako zdroj elektrické energie. Ve III. kvadrantu pracují fotodiody ve fotokonduktivním režimu, chová se jako pasivní prvek, což zapříčiní, že s rostoucí intenzitou ozáření klesá odpor a dochází ke zvýšení proudu. Fotodiody svou charakteristikou zasahují ještě do I. kvadrantu. Zde se chovají jako obyčejné plošné diody, a proto se fotodiody v přímém směru neuplatňují.

PIN fotodioda je zvláštní případ fotodiody PN, kde je mezi opačně dotovanými vrstvami „P“ a „N“ umístěna ještě vrstva „I“ (intrizitního) materiálu, který je slabě dotován. Tato vrstva má zlepšit vlastnosti PIN fotodiody oproti PN fotodiodě. Vrstva „I“ má rezistivitu 10^5 až 10^7 krát větší než krajní oblasti. Je vyrobena z čistého křemíku s nízkou hustotou příměsí, což zapříčiní velkou elektrickou pevnost (až – 500 V).¹ Díky této elektrické pevnosti pracuje s velmi vysokými intenzitami elektrického pole v oblasti přechodu. Elektrické pole zvyšuje rychlost nosičů a také šířku pásma. Velkou nevýhodou je generace teplotně závislého proudu za tmy.

Kvůli nedostatečné citlivosti se používají lavinové fotodiody neboli APD, které mají vlastní zesílení fotoproudu. Dopadající fotony vygenerují fotoelektrony, které se díky velkému závěrnému napětí silně urychlí a začnou vyražet další valenční elektrony, tj. jeden fotoelektron způsobí kaskádové vyražení dalších desítek až stovek elektronů. Dochází ke vzniku laviny, která zesiluje fotoproud. Oproti diodám PIN tato dioda vyniká vysokou rychlostí a citlivostí (přibližně stokrát), mezní frekvence světelných impulsů je v řádech desítek GHz. Nevýhodou je silná teplotní závislost, mechanismus zesílení je

¹ MAŤÁTKO, Jan. *Elektronika*. 6. vyd., V Idea servis 5., dopl. a upr. vyd. Praha: Idea servis, 2008. ISBN 978-80-85970-64-7.

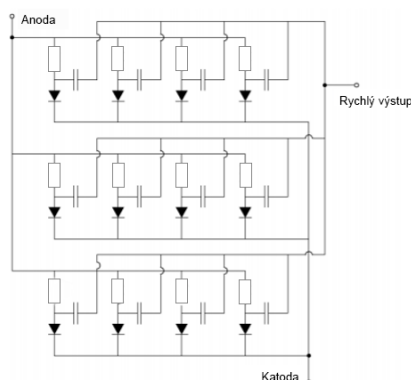
zdrojem šumu, náročnější konstrukce, nutnosti kvalitního stabilizovaného zdroje napětí, který může dosahovat pro křemíkovou APD i 300 V.²



Obr. 1.1 V-A charakteristika fotodiod [11]

1.1.2 Fotonásobiče

SiPM je další možnou variantou fotodetektoru. Jsou to relativně nové součástky, které slouží k detekování nízké úrovně světla. Mají velmi vysokou kvantovou účinnost a mnohem vyšší zisk oproti APD. Skládají se z hustého pole lavinových fotodiod, toto pole může obsahovat stovky až tisíce těchto diod na mm^2 . Provozní napětí oproti APD se pohybuje v rozmezí desítek voltů, další výhodou fotonásobičů je nízká teplotní závislost. Následující obrázek zobrazuje strukturu SiPM.³



Obr. 1.2 Vnitřní zapojení fotonásobiče [5]

² BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika: [učebnice]*. České Budějovice: KOPP, 2004. ISBN 80-7232-241-9.

³ F. Acerbi, G. Paternoster, A. Gola, V. Regazzoni, N. Zorzi and C. Piemonte, "High-Density Silicon Photomultipliers: Performance and Linearity Evaluation for High Efficiency and Dynamic-Range Applications," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 1-7, April 2018, Art no. 4700107, doi: 10.1109/JQE.2018.2802542.

1.1.3 Důležité parametry

Jedním z důležitých parametrů, podle kterých si volíme vhodný fotodetektor, je rozsah vlnových délek. Jelikož fotodetektory mohou být vyrobeny z různých materiálů jako je křemík, germanium a InGaAs, každý z těchto materiálů poskytuje jiné pokrytí vlnových délek. Například Si mají rozmezí vlnových délek 300 nm÷1100 nm, Ge 800 nm÷1600 nm a InGaAs má rozmezí 900 nm÷1700 nm.⁴

Dalším důležitým parametrem je vnitřní zisk fotodetektoru. Když budeme přijímat signál, je potřeba dosáhnout velkého zesílení, protože příliš malé zesílení způsobí ztrátu signálu v šumu. Typické hodnoty zesílení pro APD jsou od 10÷1000, pro PIN je zisk roven jedné a pro SiPM mohou hodnoty zisku dosahovat řádově až 10^7 .

Se ziskem souvisí faktor přebytečného šumu, který je vytvářen samotným detektorem. PIN mají faktor přebytečného šumu roven jedné, u APD se faktor šumu pohybuje v rozmezí 2÷10, záleží na materiálu, ze kterého je fotodetektor vyroben a také na struktuře. U SiPM se tento faktor pohybuje v rozmezích 1÷1,5.⁵

Citlivost je poměr generovaného fotoproudu a dopadajícího optického výkonu. Lze uvést, že citlivost je měřítkem účinnosti opticko-elektrické přeměny fotodetektoru a vyjadřuje hodnotu fotoproudu, který je generován každým miliwattem optického signálu.

Parametr, který nelze opomenout, je teplota diody. Protože fotodetektory jsou silně teplotně závislé, musí se tato teplota korigovat.⁶

1.1.4 Zvolení vhodného fotodetektoru

Každý fotodetektor má jiné vlastnosti, a proto je třeba pro projekt zvolit vždy ten nejvhodnější. Následující body pomohou výběr usnadnit:

- rozsah vlnových délek,
- podle rozměrů součástky, resp. velikosti aktivní plochy,
- elektrickou šířku pásma,
- teplota,

podle šumu, který se generuje ve fotodetektoru.

1.1.5 Užití fotodetektorů v praxi

Fotodetektory lze nalézt např. ve vysokorychlostních laserových skenerech, jako detektory světla, laserové dálkoměry, v rychloměrech, ceilometrech (měří výšku mraků). Dalším užitím, které poskytují fotodetektory, je detekování částic, případně se dají použít i pro datovou komunikaci.

⁴ PERKINELMER, Inc. *Avalanche photodiode: A User Guide* [online]. 2010, 5 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: https://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-6538APP_AvalanchePhotodiodesUsersGuide.pdf

⁵ P. Eckert et al., "Characterisation studies of silicon photomultipliers," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 620, 217–226 (2010).

⁶ HUI, Rongqing a Maurice S. O'SULLIVAN. *Fiber optic measurement techniques*. Burlington: Academic Press, c2009. ISBN 978-0-12-373865-3.

1.2 Srovnání fotodetektorů

Srovnání detektoru je kapitola, která se zabývá srovnáním výše zmíněných detektorů APD, PIN, SiPM.

1.2.1 Kritéria výběru

Kritéria jsou totožná pro všechny z výše uvedených typů detektorů. Materiál, ze kterého jsou vyrobeny, je křemík. Průměr aktivní plochy A_{PD} má být maximálně 0,5 mm. Vlnová délka λ se pohybuje v prvním okně infračerveného záření, tedy okolo 850 nm. Délka hrany t_r se pohybuje v řádech nanosekund. Dalším důležitým kritériem je zisk M , který musí nabývat hodnot v řádech stovek, a také citlivost $R_0(\lambda)$, která má být tak velká, aby detektor dokázal zareagovat na přivedení laserového signálu na vstup.

1.2.2 Porovnání

Typ detektoru	Označení	A_{PD} [mm]	λ [nm]	t_r [ns]	M [-]	$R_0(\lambda)$ [A/W]	I_D [nA]
APD	C30902BH	0,5	830	0,5	150	77	15
APD	AD500-8 TO	0,5	850	0,35	100	50	0,5
PIN dioda	S5973-01	0,4	830	1	1	0,47	0,01
Fotonásobič	MICROB-10035-MLP-TR1	1 x 1	905	0,9	$1,7 \times 10^6$	240×10^3	1500

Tabulka 1 Rešerše fotodetektorů

Pozn.: Hodnoty pro APD AD500-8 TO jsou vztaženy pro zisk $M = 100$.

Použité APD je AD500-8 TO, druhé APD C30902BH je zde pro srovnání hodnot.

Proud za tmy I_D je parametr součástky, který nalezneme v technické dokumentaci součástky. Horní mezní kmitočet $f_h = 350 \div 500$ MHz a dolní mezní kmitočet f_d se pohybuje v jednotkách MHz, v důsledku čehož můžeme dolní mezní kmitočet zanedbat pro účely výpočtu šumu. Šířka pásma se bude rovnat hornímu meznímu kmitočtu⁷:

$$B = f_h = 500 \text{ MHz} \quad (1.1)$$

Ze závislosti proudu za tmy na zpětném napětí odhadneme další údaje – I_{ds} , což je povrchový svodový proud, a I_{db} , tedy proud „hmotou“ polovodiče. Tyto proudy udávají proud za tmy⁸:

$$I_D = I_{ds} + I_{db} \cdot M \quad (1.2)$$

Faktor přebytečného šumu F pro fotonásobič se rovná $1 \div 1,5$ a pro APD je možné vypočítat faktor z následující rovnice⁸:

$$F = k \cdot M + (1 - k) \left(2 - \frac{1}{M} \right) \quad (1.3)$$

Případně lze využít následující tabulku, kde je možné zjistit ionizační poměr k a faktor přebytečného šumu pro danou strukturu:

⁷ Hamamatsu Optosemiconductor Handbook, Chapter 3: Si APD, MPPC

Stuktura	Ionizační poměr	Typický zisk	Faktor přebytečného šumu
	(k)	(M)	(F)
Si („Reach-through“)	0,02	150	4,9
Epitaxní Si (APD)	0,06	100	7,9

Tabulka 2 Faktor přebytečného šumu pro různé struktury

Celkový šumový proud i_n [A], je dán rovnicí¹⁰:

$$i_n = [2q \cdot (I_L + I_{db}) \cdot B M^2 F + 2q I_{ds} B]^{0,5} \quad (1.4)$$

Pozn.: Faktor přebytečného šumu u SiPM je brán z tzv. datasheetu $F = 1,22$

kde:

q ...náboj elektronu = $1,602 \cdot 10^{-19}$ [C],

I_L ...fotoproud při $M = 1$ [A].

U PIN fotodiod můžeme zanedbat faktor přebytečného šumu F a zisk M , který se rovná 1. Potom platí vztah:

$$i_n = [2q \cdot (I_L + I_{db}) \cdot B + 2q I_{ds} B]^{0,5} \quad (1.5)$$

Poměr signál/šum udává součet výkonů, které jsou obsaženy v signálu. Při výpočtu lze zanedbat povrchový svodový proud $2qI_{ds}B$ a bude se uvažovat pouze nejhorší případ, kdy celý proud za tmy bude jen I_{dg} . Výsledek je bezrozměrné číslo, ale může být udáváno v decibelové míře [dB], pak ho nazveme odstup signálu od šumu⁸:

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left(\frac{I_L^2 \cdot M^2}{2q \cdot (I_L + I_{db}) \cdot B M^2 F + 2q I_{ds} B + \frac{4 \cdot k T B}{R_L}} \right) \quad (1.6)$$

kde:

k ...Boltzmannova konstanta = $1,380 \cdot 10^{-23}$ [J · K⁻¹],

T ... je teplota, která závisí na zesilovacím bloku, nejhorší případ je 300 [K],

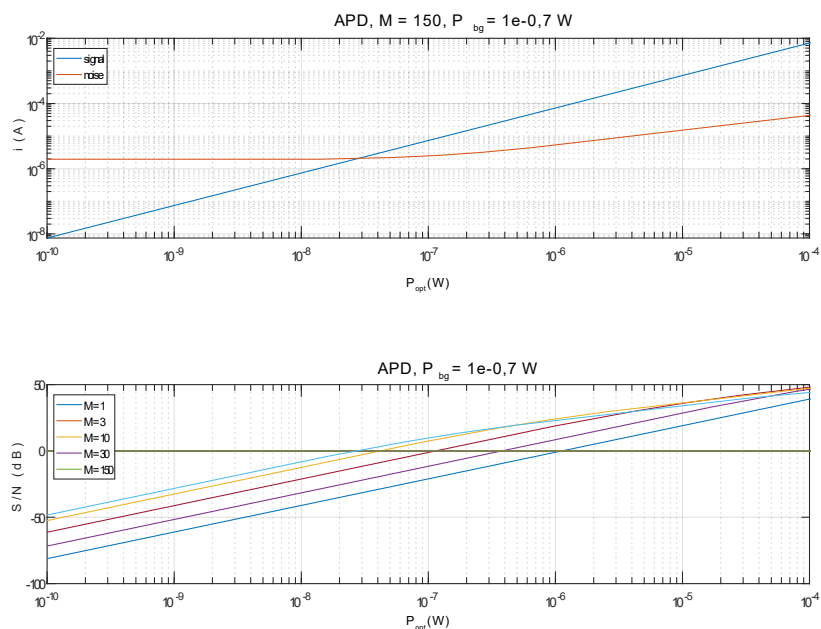
R_L ...odpor [Ω],

$\frac{4 \cdot k T B}{R_L}$...teplotní šum zesilovače.

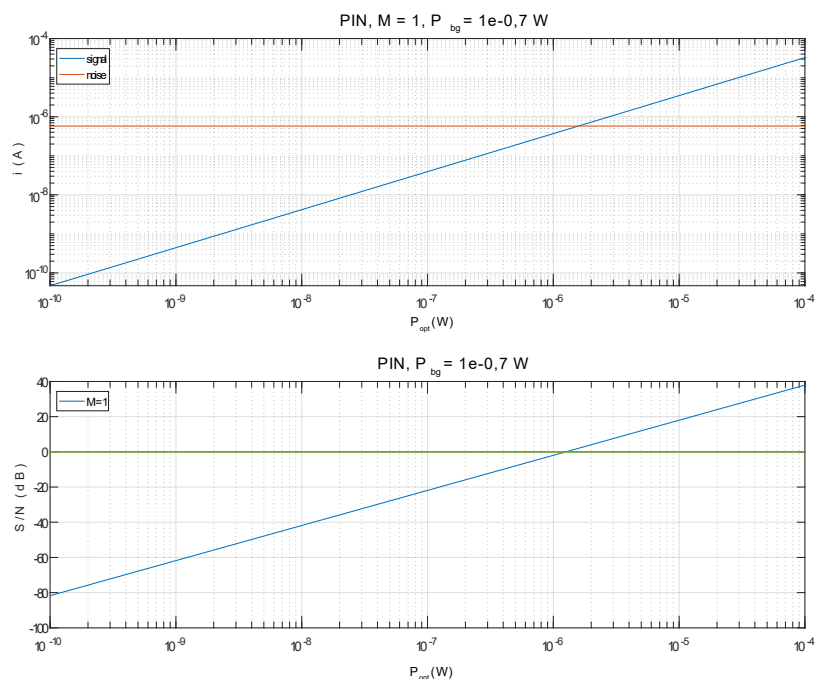
1.2.1 Shrnutí

Z výsledných grafů je vidět, že lavinová fotodiody dosahuje malých proudů řádově 10^{-6} až 10^{-2} A již při výkonu optického záření 10^{-8} W. U fotonásobiče jsou proudy příliš velké a u PIN diody je příliš malé pokrytí výkonu optického záření. Lavinová fotodiody vyniká i při odstup signálu od šumu v závislosti na výkonu optického záření, a proto byla z hlediska citlivosti a elektrické šířky pásma dána přednost konstrukci detektoru s lavinovou fotodiodou.

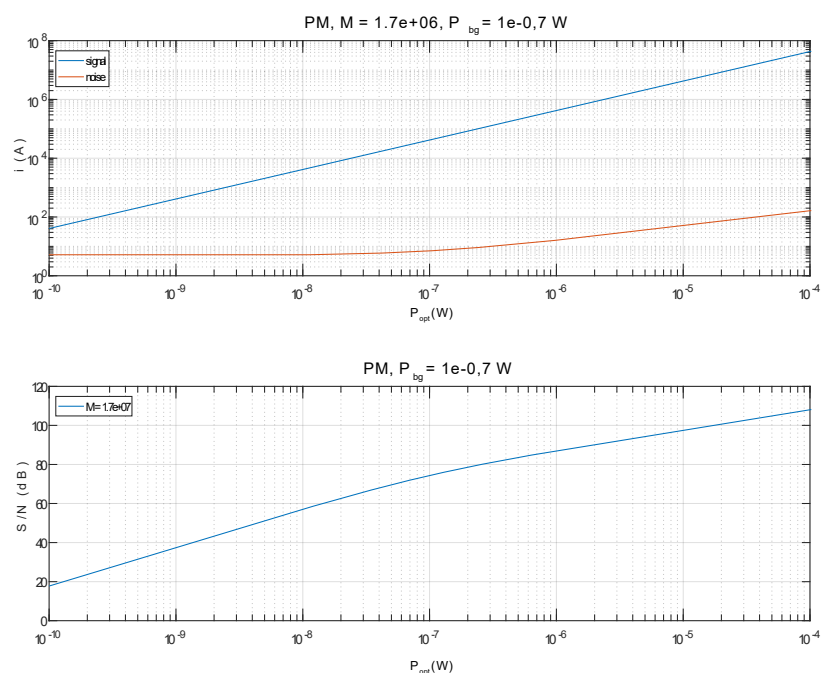
Výsledky pro vybraný detektor jsou zobrazeny ve dvou grafech za přítomnosti záření pozadí P_{bg} [W]. Horní graf vždy udává celkový šum i [A] v závislosti na optickém výkonu P_{opt} [W], kde jsou viditelné průběhy šumu a signálu. Ve spodním grafu je zobrazena závislost odstupů signálu od šumu $\frac{S}{N}$ [dB] na optickém výkonu P_{opt} [W].



Obr. 1.3 Celkový šum a odstup signálu od šumu pro APD



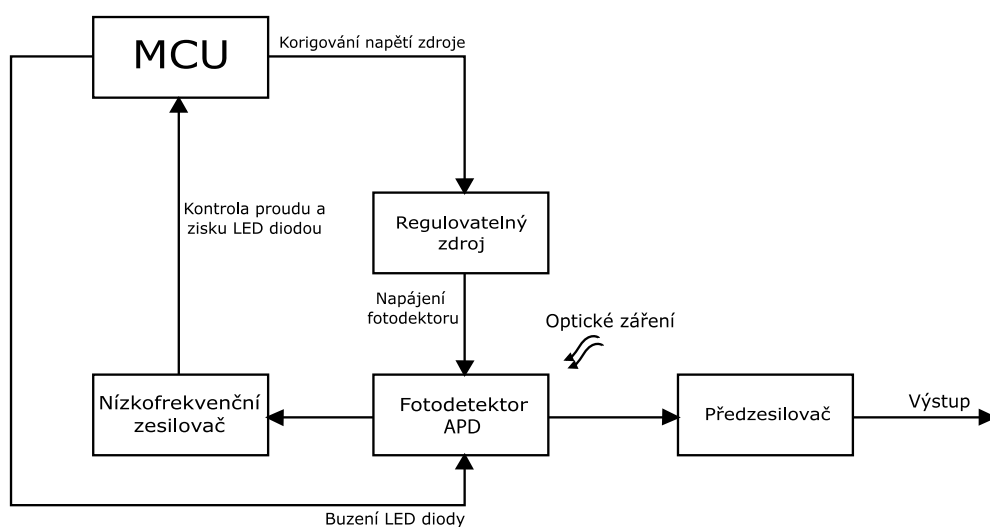
Obr. 1.4 Celkový šum a odstup signálu od šumu pro PIN



Obr. 1.5 Celkový šum a odstup signálu od šumu pro PM

1.3 Rozbor částí z návrhu

Tato kapitola se věnuje teoretickému rozboru částí, jež se nacházejí ve dvou návrzích plošných desek (APD a předzesilovač, regulovatelný zdroj a mikroprocesor). Jedná se o rozbor nízko-šumového předzesilovače, regulovatelného zdroje, mikrokontroleru a srovnání fotodetektorů.



Obr. 1.6 Blokové schéma

1.3.1 Nízko-šumový předzesilovač

LNA se používá k zesilování extrémně slabých signálů, jako je například signál z antén nebo z optických detektorů a dalších komunikačních přijímačů. Jestliže by byl zvolen nesprávný zesilovač, který by nebyl nízko-šumový, mohlo by dojít ke ztrátám důležitých informací obsažených v přijímaném signálu, neboť další přídavný šum by mohl narušit již tak slabý signál.

Ideální zesilovač by měl mít šumové číslo blízké 0 dB. Toho v praxi nelze dosáhnout, protože elektronické součástky nevyhnutelně přispívají k šumu zesilovače. Můžeme se proto jen této hodnotě přibližovat, ale nikdy jí nedosáhneme.⁸

Hodnoty zisku se pohybují od $10^2 \div 10^4$ (40 dB \div 80 dB), kde signál, který je řádově μV , zesílíme na desítky nebo stovky mV. Avšak tyto hodnoty zisku také závisí na požadované šířce pásmy např. v oblasti GHz může být zesílení jen 10-20 dB.

1.3.2 Regulovatelný zdroj

Regulovatelný zdroj má za úkol udržovat požadované napětí na vstupu APD a regulovat jej podle měnících se podmínek. V návrhu se bude používat zdroj, který je realizován DC-DC boost kontrolérem. Tento zdroj bude dosahovat hodnot 0 V až po 200 V.

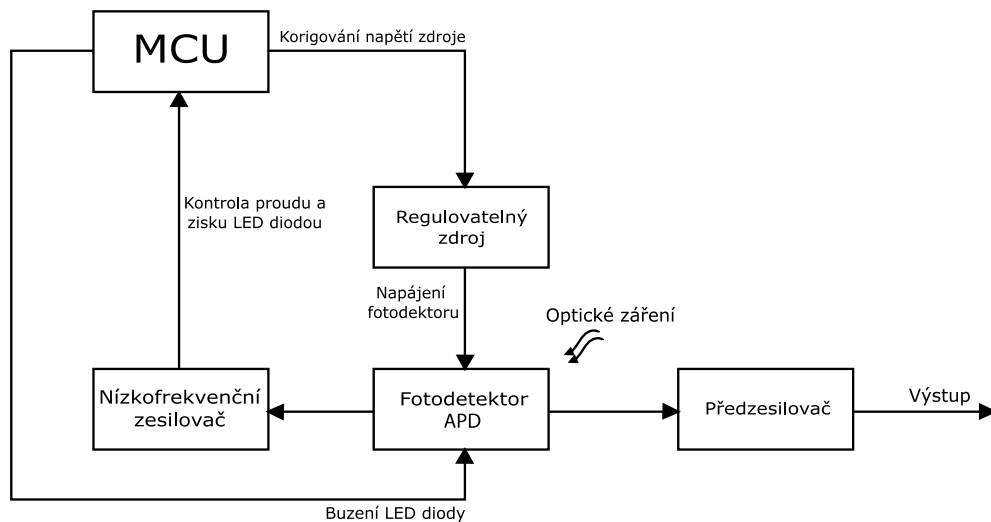
1.3.3 Mikrokontroler

Mikrokontrolerem realizujeme experimentální funkci pro automatické nastavení zisku fotodiody prostřednictvím kalibrační smyčky. Hlavní funkcí mikrokontroleru je řízení regulovatelného zdroje z pinu, který obsahuje 12bitový DA převodník. Podle signálu, který je přiveden kalibrační smyčkou zpět, nastaví 12bitový DA převodník příslušné napětí pro zdroj. Než se toto nastavení vykoná, nejprve se provedou následující akce. Mikrokontroler začne budit LED diodu, která se nachází u fotodetektoru, díky této LED diodě získáme signál. Ten je přiveden kalibrační smyčkou zpět do mikrokontroleru. Kalibrační smyčka obsahuje nízkofrekvenční zesilovač, kterým je signál z LED diody zesílen. Právě díky zesílenému nízkofrekvenčnímu signálu si MCU nastaví vhodné napětí, jímž se koriguje již zmíněné výstupní napětí zdroje. A díky této smyčce a MCU dojde k přesnému nastavení napětí pro budezení fotodetektoru, zároveň se vykompenzuje vlivu teploty a výrobního rozptylu příslušného fotodetektoru.

⁸ LI, Richard C. *RF Circuit Design, 2nd edition*. United States: John Wiley, 2012. ISBN 9781118128497.

2. NÁVRHY SCHÉMAT

V této kapitole jsou rozebrána a popsána schémata, která jsou v bakalářské práci zhotovena. Jde o dva návrhy, která jsou mezi sebou vzájemně propojeny a spolu tvoří rozhraní pro detektor optických pulsů. Jedná se o desku zdroje a mikrokontroleru a desku APD a předzesilovače.

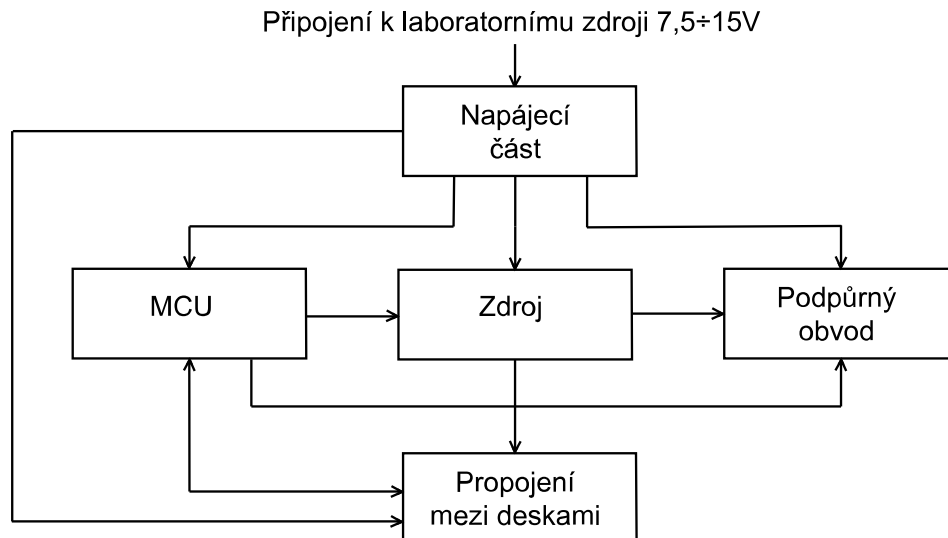


Obr. 2.1 Celkové blokové schéma

MCU jde zde kvůli řízení regulovatelného zdroje, alternativně je možné využít pro nastavení trimr.

2.1 Deska zdroje a mikroprocesoru

Základem této desky je napájecí část, mikroprocesor, zdroj, podpůrný obvod a propojení mezi deskami. Propojení těchto jednotlivých částí je naznačeno na následujícím blokovém schématu.



Obr. 2.2 Blokové schéma desky zdroje a mikroprocesoru

Na vstup napájecí části je připojen laboratorní zdroj v rozmezí 7,5 až 15 V. Toto napětí se snižuje pomocí regulátorů napětí s nízkým úbytkem (dále jen LDO) na požadovaná napětí, která slouží k napájení dalších bloků, jako je mikrokontroler, zdroj, podpůrný obvod, a také slouží jako napájení pro druhou desku.

MCU komunikuje se zdrojem, podpůrným obvodem a s druhou deskou. MCU na zdroji zajišťuje regulaci zdroje a jeho zapnutí. Při komunikaci s druhou deskou je vytvořena kalibrační smyčka, která si oměřuje signál na LED diodě. Tento údaj se poté vrací zpět k mikrokontroleru a slouží ke korigování zdroje.

Podpůrný obvod je ovládán MCU a slouží k vybíjení kondenzátorů, které se mohou nabýt až na 200 V. Tímto obvodem se předejde zranění v případě kontaktu s deskou. Zároveň podpůrný obvod vypíná spínací regulátor.

Seznamy součástek k desce zdroje a mikroprocesoru se dělí na dvě části a nachází se v Příloha A -A.1 strana 39 a v Příloha A -A.2 strana 40. Schémata se také dělí na dvě části první část se nachází Příloha A -A.3 strana 41 a druhá část se nachází v Příloha A -A.4 strana 42.

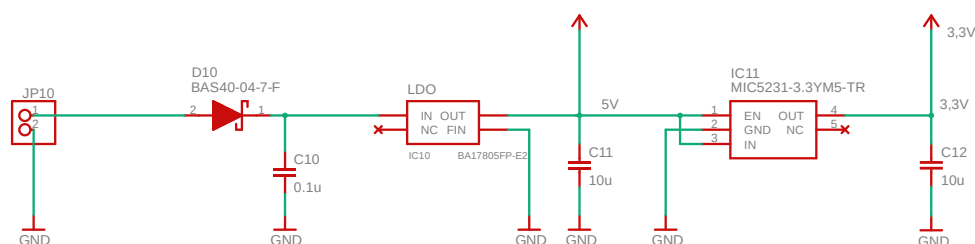
2.1.1 Napájecí část

Jak jsem již zmínil, z laboratorního zdroje přivedeme napětí v rozmezí 7,5 ÷ 15 V. Tato hodnota je pouze orientační, aby zbytečně nebyly nepřetěžovány regulátory napětí s nízkým úbytkem. Maximální připojené napětí z laboratorního zdroje je 25 V.

Schottkyho dioda D10 slouží jako ochrana proti přepólování zdroje, zároveň vykazuje menší úbytek napětí v propustném směru.

LDO IC10 BA17805FP-E2, na který je přivedeno vstupní napětí v rozsahu 7,5 ÷ 15 V, slouží ke snižování vstupního napětí na konstantní hodnotu napětí 5 V. Napětí 5 V slouží k napájení spínacího regulátoru ZXSC440X8T a zároveň je vedeno na desku vstupního dílu.

Pětivoltové napětí se přivádí také na LDO IC11 MIC5231-3.3YM5-TR, kde se snižuje 5 V na konstantní napětí 3,3 V. Výstup 3,3 V z LDO IC11 se využívá k napájení mikrokontroleru a k napájení logického hradla.



Obr. 2.3 Napájecí část

Bylo nutné stanovit tepelný výpočet lineárního regulátoru napětí IC10 BA17805FP-E2⁹, když tímto výpočtem se zjistí, zdali lineární regulátor napětí se uchladí okolním vzduchem, nebo bude potřeba navrhnout chladicí prvek. Pro stanovení teplotního výpočtu je zapotřebí změřit výstupní proud IC10 I_{out} a stanovit tepelný odpor čip-okolí $R_{thj-amb}$:

Měřená hodnota:

$$I_{out} = 13mA$$

Doporučená hodnota:

$$R_{thj-amb} = 60\text{ }^{\circ}C/W$$

$$P = (U_{in} - U_{out}) \cdot I_{out} = (25 - 5) \cdot 13 \cdot 10^{-3} = 0,26\text{ W} \quad (2.4)$$

kde:

P ...výkon stabilizátoru [W],

U_{in} ...vstupní napětí přivedené na vstup stabilizátoru [V],

U_{out} ...výstupní napětí na výstupu stabilizátoru [V],

I_{out} ...výstupní proud na výstupu stabilizátoru [mA].

$$P = \frac{T_j - T_a}{R_{thj-amb}} \Rightarrow \quad (2.5)$$

$$T_j = P \cdot R_{thj-amb} + T_a = 0,26 \cdot 60 + 20 = 35,5^{\circ}C$$

Kde:

T_j ...pracovní teplota čipu,

T_a ...teplota okolí = +20°C,

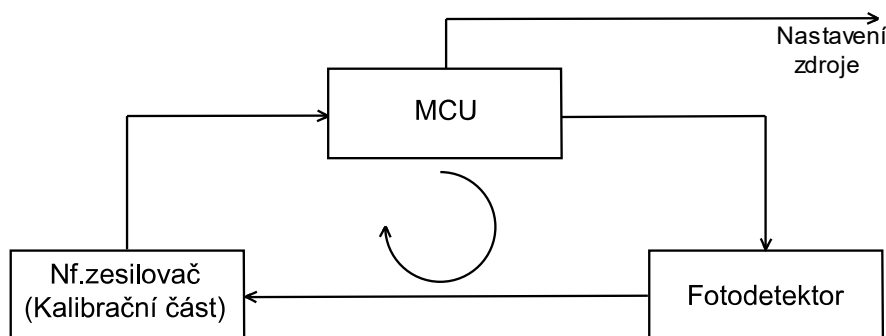
$R_{thj-amb}$...tepelný odpor čip-okolí [$^{\circ}C/W$].

⁹ ROHM, BA17805FP-E2 [online], [cit.2021-05-26]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1747296.pdf>

Jelikož maximální teplota stabilizátoru je $T_{max} = 150^{\circ}\text{C}$, bylo nutné stanovit pracovní teplotu čipu při průchodu proudem I_{out} . Výpočtem vychází pracovní teplota $T_j = 35,5^{\circ}\text{C}$, tudíž můžeme prohlásit, že není potřeba navrhnout chladicí prvek, protože $T_{max} > T_j$.

2.1.1 Kalibrační smyčka

Pro pochopení využití MCU je potřeba vysvětlit funkci kalibrační smyčky. Kalibrační smyčku tvoří MCU, fotodetektor a nízkofrekvenční zesilovač. Na následujícím blokovém schématu je vysvětleno, jak kalibrační smyčka funguje.



Obr. 2.4 Kalibrační smyčka

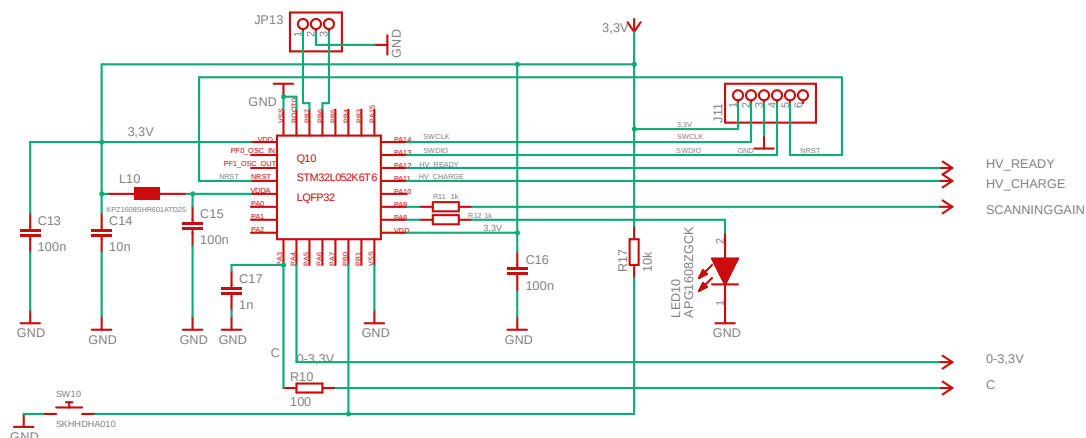
Mikrokontroler vyšle generovaný signál z pinu, kde je DA převodník, který budí LED diodu, jež se nachází v blízkosti fotodetektoru. LED diodou prochází nízkofrekvenční signál, který se dostane do nízkofrekvenčního zesilovače (pozn.: nízkofrekvenční zesilovač se nachází v kalibrační části). Nízkofrekvenční zesilovač tento signál zesílí 50krát a vyšle tento signál zpět do mikrokontroleru na pin, který poskytuje funkci AD převodníku. ADC tento signál změří, a jelikož je tento převodník 12-bit, tak maximální hodnota je 4096. Tato funkce umožňuje nastavení napětí v rozmezí $0 \div 3,3 \text{ V}$, kterým je buzen spínací regulátor a slouží k přesnému nastavení napětí pro fotodetektor, a ke kompenzaci teplotního vlivu a výrobního rozptylu.

2.1.2 Funkce mikrokontroleru

Funkcí mikrokontroleru je řízení zdroje, zkratování vysokonapěťových kondenzátorů pro jejich vybíjení, vypínání zdroje, oměřování kalibrační smyčky, korigování napájecího napětí pro fotodetektor.

Pomocí LED diody, která se nachází na desce APD a předzesilovače, získáme definovaný signál, díky němuž bude mikrokontroler nastavovat napětí v rozmezí $0 \div 3,3 \text{ V}$ pro regulovatelný zdroj. Kvůli tomuto napětí se zkompenzuje vliv teploty a výrobní rozptyl APD. Napětí $0 \div 3,3 \text{ V}$ je odebíráno na výstupu mikroprocesoru z pinu PA4 a tento pin obsahuje 12bitový D/A převodník. LED dioda, nacházející se na desce APD a předzesilovače, se budí z pinu PA9, vede se k ní signál `Scanning_gain`. Další signály, které se vedou ke zdroji, jsou `HW_ready` a `HV_charge`. Přiváděný signál `C` je také signál z APD desky, ten se v mikrokontroleru navzorkuje a mikrokontroler z něj může kontrolovat zisk a kontrolovat proud diodou, protože je vázán jednosměrně.

Další funkce MCU je na dvou pinech PA8 a PB0. PA8 je signalizace funkčnosti MCU pomocí zelené LED diody D11. PB0 je připojení tlačítka SW10 pomocí pull-up rezistoru R11, toto tlačítko spouští kalibraci. Piny PB7 a PB6 slouží jako UART komunikace. UART je synchronní a asynchronní sériové rozhraní, které komunikuje sériově pomocí dvou vodičů v obou směrech, jedná se tedy o plný duplex. Používá se pro komunikaci například mezi dvěma mikrokontrolery, či komunikaci s počítačem.

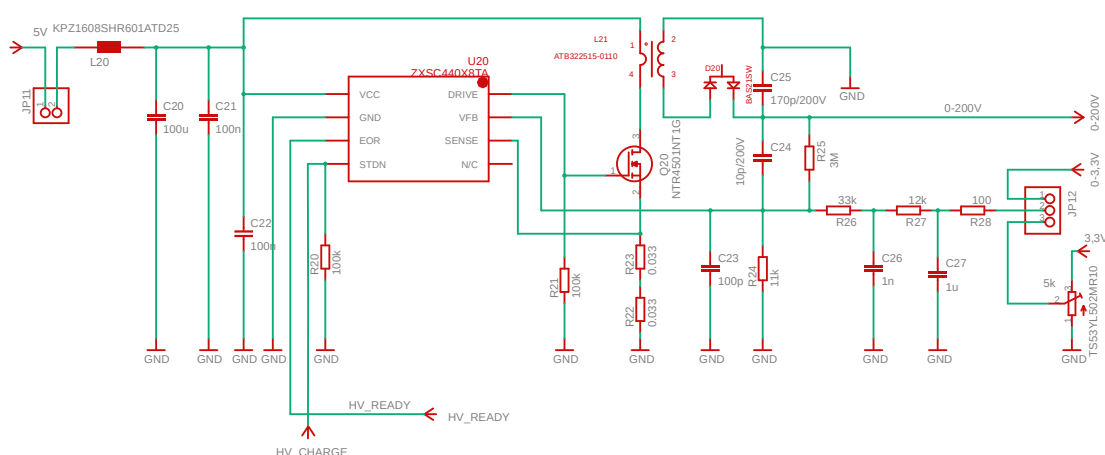


Obr. 2.5 Zapojení MCU

Feritová perlička L10 slouží k potlačení šumu, společně s kondenzátorem C15 tvoří LC dolní propust, která nepropouští signál o vyšších frekvencích.

Dolní propust RC v tomto schématu tvoří R10 a C18. Kvůli převodníkům s postupnou aproximací, které mají na počátku vzorkovač, kde dochází ke zvýšení proudu. Když zdroj signálu bude mít měkký charakter (zdroj signálu bude mít velkou impedanci), tak nastane chyba měření. Právě proto se zde zavádí C18, který zabrání vzniku chyby při vzorkování.

2.1.3 Zdroj



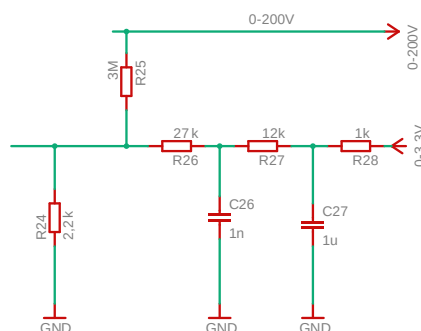
Obr. 2.6 Celkové zapojení zdroje

Napájecí napětí spínaného regulátoru je 5 V. Pin STDN je stále aktivní. Jakmile je vypnut signál HV_charge, tak tento pin zařídí vypnutí celého DC-DC boost kontroleru. Pin EOR slouží jako ukazatel, kdy je vysokonapěťový kondenzátor plně nabit. Pin DRIVE budi

hradlo spínacího tranzistoru. Pin SENSE je snímač proudu, který teče sekundární cívkou transformátoru. K tomu se připojují dva snímací rezistory R22 a R23. Snímací odpor je podobným běžným rezistorům, ale s velmi nízkou hodnotou odporu a vysokým výkonem. Na pin VFB je přivedena reference 0,3 V, díky zpětné vazbě se bude pořád udržovat tato hodnota napětí. Zpětná vazba je realizována R24, R25, R26, R27 a R28. Tyto odpory jsou zapojeny do hvězdy.

Jestliže známe všechna napětí, tak si zvolíme jeden odpor a zbylé dopočítáme. Je zvoleno R25, že se rovná 3 MΩ. R₂₆₇₈ jsou odpory v sérii R₂₆₇₈ = R₂₆ + R₂₇ + R₂₈:

Nejvyšší možné napětí:



Obr. 2.7 Schéma zapojení odporů

$$0 = \frac{200 - 0,3V}{R_{25}} + \frac{3 - 0,3V}{R_{2678}} - \frac{0,3V}{R_{24}} \quad (2.6)$$

$$\frac{0,3V}{R_{24}} = \frac{199,7V}{R_{25}} + \frac{2,7V}{R_{2678}}$$

Jestliže napětí z mikrokontroleru bude teoreticky 0 V, můžeme tento člen zanedbat, zároveň můžeme zanedbat člen 200 V/ 3MΩ, poté dostaneme:

$$0 = \frac{0,3V}{R_{24}}$$

Dosadíme do rovnice, kde jsou nejvyšší možná napětí:

$$0 = \frac{199,7V}{R_{25}} + \frac{2,7V}{R_{2678}}$$

$$\frac{199,7V}{3M\Omega} = \frac{2,7V}{R_{2678}}$$

Dopočítáme odpor R₂₆₇₈:

$$|R_{2678}| = \frac{2,7V}{\frac{-199,7V}{3M\Omega}} = 40,6 \text{ k}\Omega$$

Dopočítání odporu R_{24} :

$$R_{24} = \frac{0,3V}{\left(\frac{199,7V}{3M\Omega} + \frac{2,7V}{40,6k\Omega}\right)} = 2,25 k\Omega$$

Tyto hodnoty byly zvoleny o něco vyšší než vypočítané, aby se nacházely v odporové řadě. $R_{2678} = R_{26} + R_{27} + R_{28}$ voleny byly odpory $R_{26} = 27 k\Omega$, $R_{27} = 12 k\Omega$, $R_{28} = 1 k\Omega$ a $R_{24} = 2,2 k\Omega$.

Jedná se standardní měnič typu fly-back. Dioda D20 slouží k usměrnění výstupního napětí.

L20 je feritová perlička, tato slouží k potlačení šumu. Společně s kondenzátorem C20 tvoří LC dolní propust, která nepropouští signál o vyšších frekvencích.

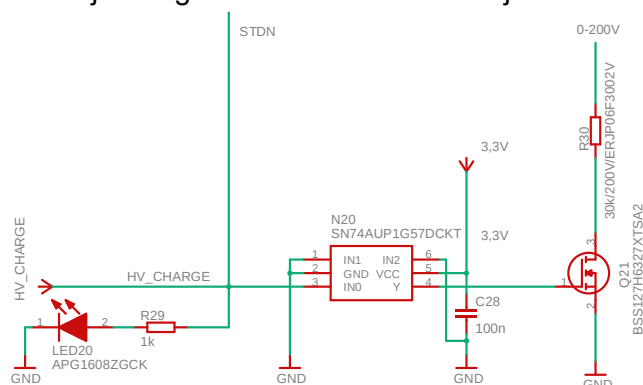
Trimr TS53YL502MR10 slouží jako alternativa pro nastavení napětí zdroje. Pomocí jumperu lze přepínat mezi trimrem a DA převodníkem.

Ostatní součástky jsou doporučeny výrobcí.

2.1.4 Podpůrný obvod

Logické hradlo N20 je napájeno z 3,3 V. Na hradlo je přiveden signál HV_charge. Jakmile se vysoká úroveň HV_charge změní na nízkou úroveň, tak na vstupu hradla N20 bude logická nula, poté se na výstupu Y logického hradla objeví vysoká úroveň, která sepne tranzistor Q21 (jedná se o MOSFET tranzistor s N kanálem). Jakmile tranzistor sepne, způsobí vyzkratování vysokonapěťových kondenzátorů, které se začnou vybíjet. Signál HV_charge je přiveden na spínací regulátor a umožňuje jeho vypnutí.

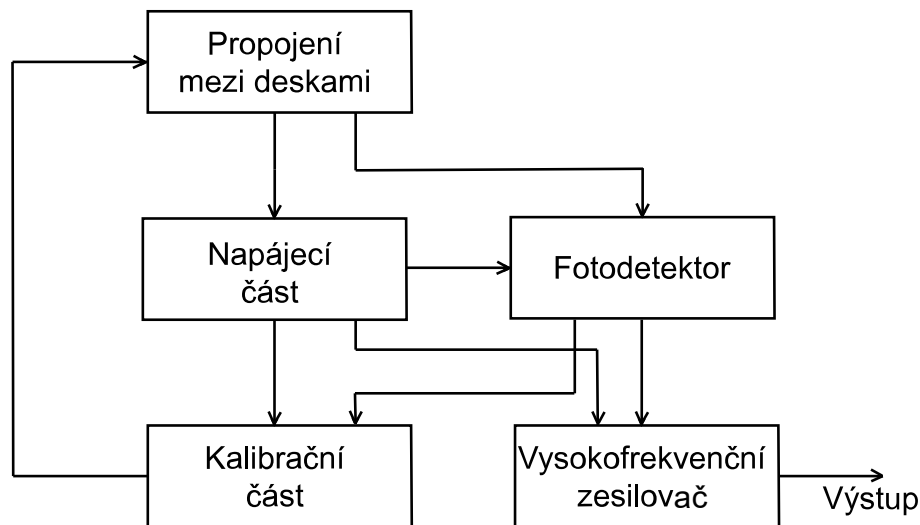
LED dioda LED20 slouží jako signalizace funkčnosti zdroje.



Obr. 2.8 Zapojení vybíjecího obvodu

2.2 Deska APD a předzesilovače

Základem této desky je napájecí část, fotodetektor, kalibrační část (nízkofrekvenční zesilovač), vysokofrekvenční zesilovač (předzesilovač) a propojení mezi deskami. Propojení těchto jednotlivých částí je naznačeno na následujícím blokovém schématu.



Obr. 2.9 Blokové schéma APD a předzesilovače

Přes konektor jsou z desky zdroje a mikrokontroleru přivedeny signály (5 V, napájecí napětí pro fotodetektor UCC_200V, Scanning_gain a zpětně se vracějící signál C).

Napětí 5 V se vede do napájecí části, kde se nachází LDO, který vstupní napětí transformuje na 3,3 V. Toto napětí slouží jako napájecí napětí pro vysokofrekvenční zesilovač a pro nízkofrekvenční zesilovač.

Blok fotodetektoru obsahuje patici, do které se bude vkládat lavinová fotodioda. Patice je zde proto, protože se jedná o univerzální desku, do které může být vsazen jakýkoliv fotodetektor splňující požadované parametry. V blízkosti fotodetektoru se nachází LED dioda, funkce této diody je probírána v kapitole 2.1.1 Kalibrační smyčka.

Dalším důležitým blokem je vysokofrekvenční zesilovač, který zesiluje střídavý signál z fotodetektoru. Zesílený signál je přes koaxiální kabel připojen k osciloskopu.

V bloku kalibrace se nachází nízkofrekvenční zesilovač, který je součástí kalibrační smyčky (viz kapitola 2.2.4 Nízkofrekvenční zesilovač).

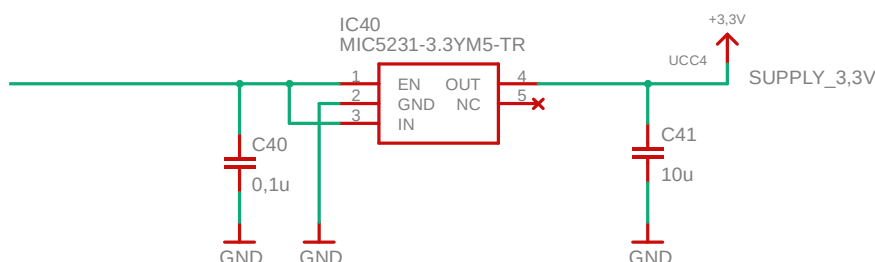
Seznamy součástek k desce APD a předzesilovače se nacházejí v Příloha B - Příloha A -A.4B.1 strana 43. Schéma se nachází Příloha B - B.2 strana 44. V následující Tabulka 3 Rešerše předzesilovačů je provedena rešerše různých typů zesilovačů a srovnání jejich hlavních parametrů. Ve všech parametrech vyniká zesilovač BGA729N6, avšak kvůli jeho rozměrům nebylo možné tento zesilovač použít. Proto se využil běžně dostupnější typ zesilovače, a to MAX2650EUS+T¹⁰, který dosahuje horších parametrů, ale pro laboratorní měření je dostačující.

¹⁰ Maxim Integrated Products, MAX2650EUS-T [online],2003, [cit.2021-05-26]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/256/MAX2650-1515556.pdf>

Typ	Šířka pásma BW [MHz]	Zesílení G [dB]	Šum NF [dB]	Provozní napětí U_{CC} [V]	Provozní teplota T_P [°C]	Šumo v teplota zesilovače T_S [K]
MAX2650EUS+T	100 ÷ 1000	18,3	3,9	4,5 ÷ 5,5	-40 ÷ +85	421,87
MAR-8ASM+	0 ÷ 1000	25	3,1	3,7	-40 ÷ +85	302,10
ADL5535	20 ÷ 1000	14,9	3,3	4,75 ÷ 5,25	-40 ÷ 85	330,01
ADL5530	10 ÷ 1000	16,5	2,5 ÷ 3,5	3 ÷ 5	-40 ÷ 85	225,7 ÷ 359,23
BGA3015	40 ÷ 1006	15	2,5 ÷ 3,0	7,6 ÷ 8,4	-40 ÷ 85	225,7 ÷ 288,62
BGA3018	40 ÷ 1006	18	2,5 ÷ 3,0	7,6 ÷ 8,4	-40 ÷ 85	225,7 ÷ 288,62
BGA729N6	70 ÷ 1000	16,3	1,05	1,5 ÷ 3,3	-40 ÷ 85	79,32
LHA-13LN+	1 ÷ 1000	22,4	1,1	3 ÷ 5	-40 ÷ 105	83,59

Tabulka 3 Rešerše předzesilovačů¹¹

2.2.1 Napájecí část



Obr. 2.10 LDO na vstupní desce

Na LDO je přiveden signál 5 V a na výstupu naměříme konstantní signál 3,3 V, který slouží jako napájecí napětí pro nízkofrekvenční zesilovač a předzesilovač.

2.2.2 Fotodetektor

V této části se nachází patice pro fotodetektor TF183. Díky patici je možné měřit jiné fotodetektory, které splňují potřebné parametry. Napájení 0-200 V pro fotodetektor je realizováno pomocí zdroje. R40 spolu s C42 a C43 tvoří filtr typu dolní propust pro snížení rušení ze strany napájecího zdroje. Funkce LED diody D40 již byla probírána

¹¹ Mini-Circuits, MAR-8ASM+ [online], [cit.2021-05-26]. Dostupné z:

https://cz.mouser.com/datasheet/2/1030/MAR_8ASM_2b-1699752.pdf

Analog Devices, ADL5535 [online], [cit.2021-05-26]. Dostupné z:

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5535.pdf>

Analog Devices, ADL5530 [online], [cit.2021-05-26]. Dostupné z:

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5530.pdf>

NXP, BGA3018 [online], 2013, [cit.2021-05-26]. Dostupné z:

<https://cz.mouser.com/datasheet/2/302/BGA3018-1126088.pdf>

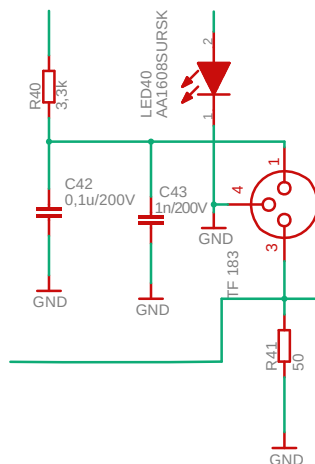
infineon, BGA729N6 [online], 2015, [cit.2021-05-26]. Dostupné z:

https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BGA729N6-DS-v03_00-EN.pdf?fileId=5546d46254e133b401552f3e23ae69c3

Mini-Circuits, LHA-13LN+ [online], [cit.2021-05-26]. Dostupné z:

<https://cz.mouser.com/datasheet/2/302/BGA3018-1126088.pdf>

v kapitole 2.1.2. Signál z APD jde do zesilovače, kam neprojde stejnosměrná složka kvůli vazebnímu kondenzátoru. Úbytek napětí na R41 se snímá nf zesilovačem.

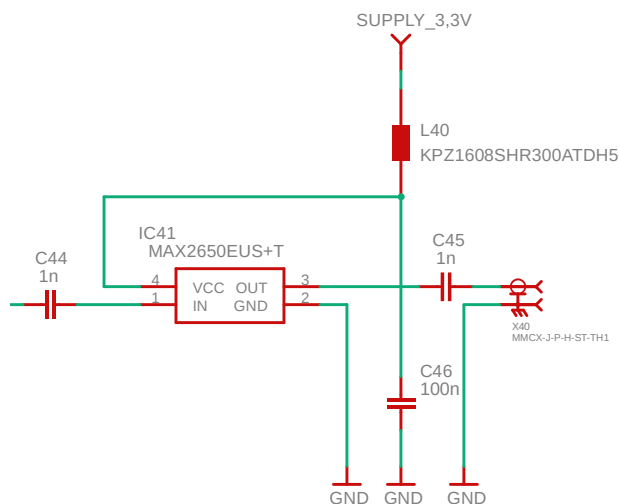


Obr. 2.11 Zapojení APD

2.2.3 Předzesilovač

Předzesilovač zesiluje přijatý signál. Ten je realizován výstupem pro koaxiální kabel, který se dále připojuje k osciloskopu. U předzesilovače jsou k pinům IN a OUT připojeny vazební kondenzátory C44 a C45.

L40 je feritová perlička, ta slouží k potlačení šumu. Společně s kondenzátorem C46 tvoří LC dolní propust, která nepropouští signál o vyšších frekvencích.

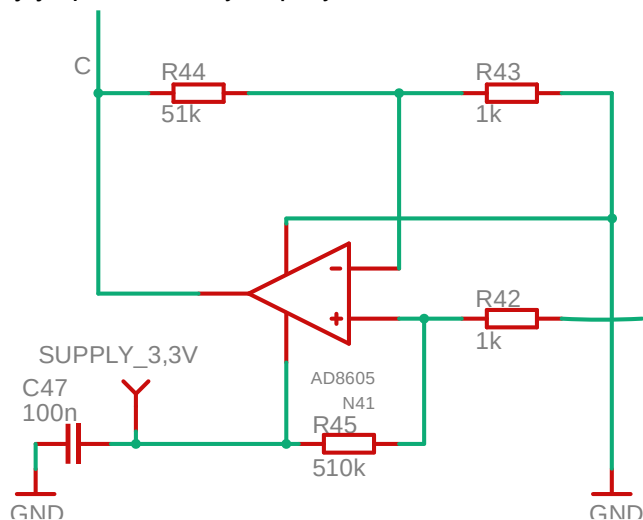


Obr. 2.12 Zapojení předzesilovače

2.2.4 Nízkofrekvenční zesilovač

Nízkofrekvenční zesilovač N41 zesiluje úbytek na R41 pro účely zpracování v MCU. Pracuje tedy jako snímač odezvy na buzení APD pomocí LED diody umístěné u fotodetektoru. Jelikož je vázán stejnosměrně, může měřit zisk a kontrolovat proud diodou. Pro správnou funkci nízkofrekvenčního zesilovače je třeba navrhnout zesílení,

nulovací úroveň zesilovače a offsetové napětí při námi zvoleném zesílení. Zesílení bylo odhadnuto a poté byly zpětně voleny odpory R42, R43, R44, R45:



Obr. 2.13 Schéma nízkofrekvenčního zesilovače

$$A = 1 + \frac{R44}{R43} = 1 + \frac{51k}{1k} = 52 \quad (2.7)$$

$$U_L = U_{CC} \cdot \frac{R42 + R41}{(R42 + R41) + R45} \cdot A = \quad (2.8)$$

$$= 3,3 \cdot \frac{1k + 50}{(1k + 50) + 510k} \cdot 52 = 0,35 \text{ V}$$

$$U_{\text{offset}} = U_{OS} \cdot A = 20\mu \cdot 52 = 1,04 \text{ mV} \quad (2.9)$$

kde:

A... zesílení,

U_L ... nulovací úroveň [V],

U_{CC} ... napájecí napětí nízkofrekvenčního zesilovače [V],

U_{OS} ... offsetové napětí zesilovače viz datasheet [μ V],

U_{offset} ... offsetové napětí při zesílení A [V].

Ostatní součástky jsou doporučeny výrobcí.

3. PRAKTICKÁ ČÁST

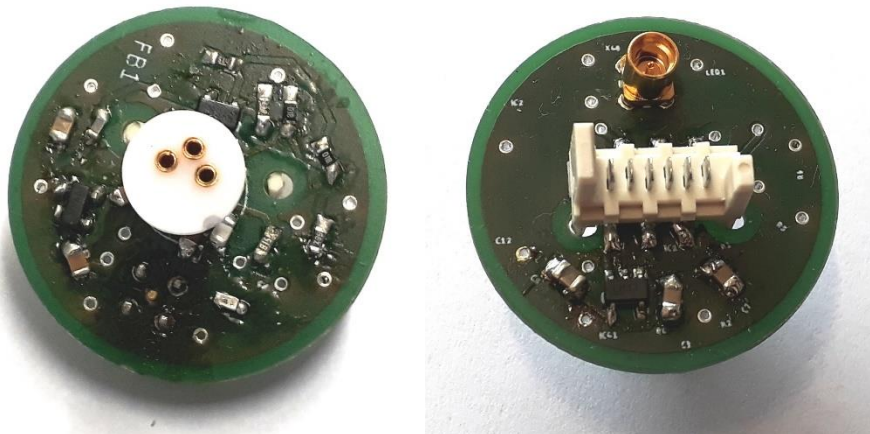
3.1 Návrhy a konstrukce DPS

Návrhy schémat a návrhy desek plošných spojů byly realizovány v prostředí programu EAGLE. Při návrhu rozhraní pro detektor optických pulsů bylo bráno v potaz, že každý pasivní prvek má parazitní jevy, jako je kapacita, indukčnost a odpor. Částečně se parazitním jevům vyhneme, pokud budou použity co nejmenší pouzdra, v našem případě pouzdra pasivních prvků 0603 a 0805.

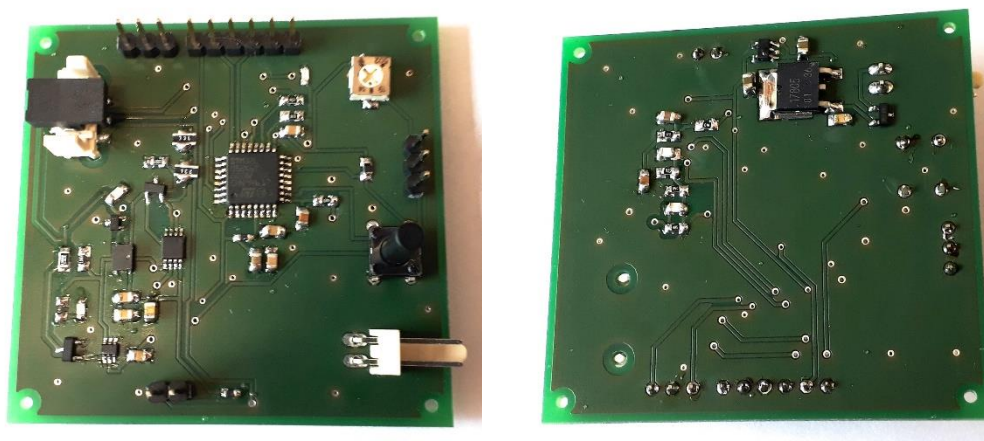
Bylo nutné vybrat vhodné konektory na propojení mezi deskami, podmínkou bylo jmenovité napětí do 200 V. Zvoleny byly konektory od firmy Molex. Tyto konektory mají maximální jmenovité napětí 250 V. To samé bylo potřeba splnit pro propojovací kabel, který také vyrábí firma Molex, jeho maximální jmenovité napětí je 250 V.

Filtrační kondenzátory jsou umístěny co nejbližší aktivním prvkům, aby se potlačily parazitní indukce.

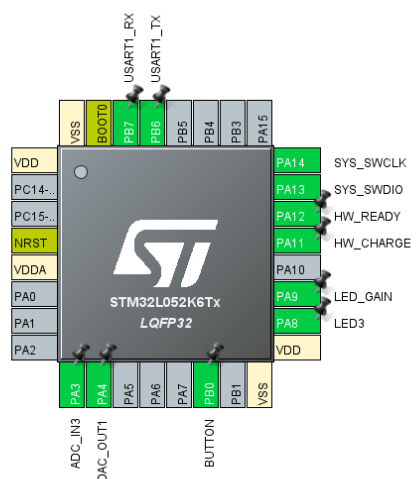
Návrhy desek jsou k dispozici v Příloha C -Návrhy DPS strana 45, kde se jedná o přílohy C.1 Návrh DPS Zdroj a mikroprocesor horní strana, C.2 Návrh DPS Zdroj a mikroprocesor dolní strana, C.3 Návrh DPS APD a předzesilovač horní strana a C.4 Návrh DPS APD a předzesilovač dolní strana.



Obr. 3.1 Osazená deska APD a předzesilovače



Obr. 3.2 Osazená deska MCU a zdroje



Obr. 3.3 Konfigurace MCU v programu CUBE

```

118= int main(void)
119 {
120     /* USER CODE BEGIN 1 */
121     int dacval, adcval;
122
123
124     /* USER CODE END 1 */
125
126     /* MCU Configuration-----*/
127
128     /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick. */
129     HAL_Init();
130
131     /* USER CODE BEGIN Init */
132
133     /* USER CODE END Init */
134
135     /* Configure the system clock */
136     SystemClock_Config();
137
138     /* USER CODE BEGIN SysInit */
139
140     /* USER CODE END SysInit */
141
142     /* Initialize all configured peripherals */
143     MX_GPIO_Init();
144     MX_ADC_Init();
145     MX_DAC_Init();
146     MX_USART1_UART_Init();
147     /* USER CODE BEGIN 2 */

```

Obr. 3.4 Výpis hlavní části smyčky v main() část 1.

```

148 //zrusit buffery
149 setvbuf(stdin, NULL, _IONBF, 0);
150 setvbuf(stdout, NULL, _IONBF, 0);
151
152 //vypnout HV zdroj (pro jistotu)
153 HAL_GPIO_WritePin(HW_CHARGE_GPIO_Port, HW_CHARGE_Pin, GPIO_PIN_RESET);
154 //vypnout GAIN LED
155 HAL_GPIO_WritePin(LED_GAIN_GPIO_Port, LED_GAIN_Pin, GPIO_PIN_RESET);
156
157 //uvodni hlaseni
158 printf("APD started\n");
159 HAL_GPIO_WritePin(LED3_GPIO_Port, LED3_Pin, GPIO_PIN_SET);
160
161 //aktivovat DAC
162 HAL_DAC_Start(&hdac, DAC_CHANNEL_1);
163 //vystup na max. napeti
164 dacval = 4095;
165 HAL_DAC_SetValue(&hdac, DAC_CHANNEL_1, DAC_ALIGN_12B_R, dacval); //max Vdac = min VHV
166
167 /* USER CODE END 2 */
168
169 /* Infinite loop */
170 /* USER CODE BEGIN WHILE */
171 while (1)
172 {
173     /* USER CODE END WHILE */
174     /* USER CODE BEGIN 3 */
175 }
176
177

```

Obr. 3.5 Výpis hlavní části smyčky v main() část 2.

```

178 //nekonecna smycka
179
180 //cte radek vc. LF
181 fgets(buffer, BLEN-1, stdin);
182
183 if (strlen(buffer) < 2 )
184     continue; //moc kratky radek
185
186 switch (buffer[0]) {
187     case '0': //vypne HV zdroj
188         HAL_GPIO_WritePin(HW_CHARGE_GPIO_Port, HW_CHARGE_Pin, GPIO_PIN_RESET);
189         printf("HV OFF\n");
190         break;
191     case '1': //zapne HV zdroj
192         HAL_GPIO_WritePin(HW_CHARGE_GPIO_Port, HW_CHARGE_Pin, GPIO_PIN_SET);
193         printf("HV ON\n");
194         break;
195     case 'i': //informace o nastaveni DAC
196         printf("DAC = %d\n", dacval);
197         break;
198     case 'd': //nastavit DAC
199         if ( (strlen(buffer) < 4) || (sscanf(&buffer[2], "%d", &dacval) != 1) ) {
200             //chyba
201             printf("DAC set error\n");
202         }
203     }
204 }
205

```

Obr. 3.6 Výpis hlavní části smyčky v main() část 3.

```

206 } else {
207     //OK
208     if (dacval < 0) dacval = 0;
209     if (dacval > 4095) dacval = 4095;
210     //nastavit na DA
211     HAL_DAC_SetValue(&hdac, DAC_CHANNEL_1, DAC_ALIGN_12B_R, dacval);
212     printf("new DAC = %d\n", dacval);
213 }
214 break;
215
216 case 'a': //cte ADC
217     adcval = read_ADC();
218     printf("ADC = %d\n", adcval);
219     break;
220
221 case 'g': //mereni zisku
222 {
223     int i, j, acc;
224
225     printf("GAIN measurement\n");
226     //nulovat akumulator
227     acc = 0;
228     //cyklus pro stanoveny pocet period
229     for (i=0; i < NPER; i++) {
230
231         //nastavit H a cekat
232         HAL_GPIO_WritePin(LED_GAIN_GPIO_Port, LED_GAIN_Pin, GPIO_PIN_SET);
233         HAL_Delay(TPER2);
234         //mereni
235         adcval = 0;
236     }
237 }
238 }
239 }
240 }
241 }
242 }
243 }
244 }
245 }
246 }
247 }
248 }
249 }
250 }
251 }
252 }
253 }
254 }
255 }
256 }
257 }
258 }
259 }
260 }
261 }
262 }
263 }
264 }
265 }
266 }
267 }
268 }
269 }
270 }
271 }
272 }
273 }
274 }
275 }
276 }
277 }
278 }
279 }
280 }
281 }
282 }
283 }
284 }
285 }
286 }
287 }
288 }
289 }
290 }
291 }
292 }
293 }
294 }
295 }
296 }
297 }
298 }
299 }
300 }
301 }
302 }
303 }
304 }
305 }
306 }
307 }
308 }
309 }
310 }
311 }
312 }
313 }
314 }
315 }
316 }
317 }
318 }
319 }
320 }
321 }
322 }
323 }
324 }
325 }
326 }
327 }
328 }
329 }
330 }
331 }
332 }
333 }
334 }
335 }
336 }
337 }
338 }
339 }
340 }
341 }
342 }
343 }
344 }
345 }
346 }
347 }
348 }
349 }
350 }
351 }
352 }
353 }
354 }
355 }
356 }
357 }
358 }
359 }
360 }
361 }
362 }
363 }
364 }
365 }
366 }
367 }
368 }
369 }
370 }
371 }
372 }
373 }
374 }
375 }
376 }
377 }
378 }
379 }
380 }
381 }
382 }
383 }
384 }
385 }
386 }
387 }
388 }
389 }
390 }
391 }
392 }
393 }
394 }
395 }
396 }
397 }
398 }
399 }
400 }
401 }
402 }
403 }
404 }
405 }
406 }
407 }
408 }
409 }
410 }
411 }
412 }
413 }
414 }
415 }
416 }
417 }
418 }
419 }
420 }
421 }
422 }
423 }
424 }
425 }
426 }
427 }
428 }
429 }
430 }
431 }
432 }
433 }
434 }
435 }
436 }
437 }
438 }
439 }
440 }
441 }
442 }
443 }
444 }
445 }
446 }
447 }
448 }
449 }
450 }
451 }
452 }
453 }
454 }
455 }
456 }
457 }
458 }
459 }
460 }
461 }
462 }
463 }
464 }
465 }
466 }
467 }
468 }
469 }
470 }
471 }
472 }
473 }
474 }
475 }
476 }
477 }
478 }
479 }
480 }
481 }
482 }
483 }
484 }
485 }
486 }
487 }
488 }
489 }
490 }
491 }
492 }
493 }
494 }
495 }
496 }
497 }
498 }
499 }
500 }
501 }
502 }
503 }
504 }
505 }
506 }
507 }
508 }
509 }
510 }
511 }
512 }
513 }
514 }
515 }
516 }
517 }
518 }
519 }
520 }
521 }
522 }
523 }
524 }
525 }
526 }
527 }
528 }
529 }
530 }
531 }
532 }
533 }
534 }
535 }
536 }
537 }
538 }
539 }
540 }
541 }
542 }
543 }
544 }
545 }
546 }
547 }
548 }
549 }
550 }
551 }
552 }
553 }
554 }
555 }
556 }
557 }
558 }
559 }
560 }
561 }
562 }
563 }
564 }
565 }
566 }
567 }
568 }
569 }
570 }
571 }
572 }
573 }
574 }
575 }
576 }
577 }
578 }
579 }
580 }
581 }
582 }
583 }
584 }
585 }
586 }
587 }
588 }
589 }
590 }
591 }
592 }
593 }
594 }
595 }
596 }
597 }
598 }
599 }
600 }
601 }
602 }
603 }
604 }
605 }
606 }
607 }
608 }
609 }
610 }
611 }
612 }
613 }
614 }
615 }
616 }
617 }
618 }
619 }
620 }
621 }
622 }
623 }
624 }
625 }
626 }
627 }
628 }
629 }
630 }
631 }
632 }
633 }
634 }
635 }
636 }
637 }
638 }
639 }
640 }
641 }
642 }
643 }
644 }
645 }
646 }
647 }
648 }
649 }
650 }
651 }
652 }
653 }
654 }
655 }
656 }
657 }
658 }
659 }
660 }
661 }
662 }
663 }
664 }
665 }
666 }
667 }
668 }
669 }
670 }
671 }
672 }
673 }
674 }
675 }
676 }
677 }
678 }
679 }
680 }
681 }
682 }
683 }
684 }
685 }
686 }
687 }
688 }
689 }
690 }
691 }
692 }
693 }
694 }
695 }
696 }
697 }
698 }
699 }
700 }
701 }
702 }
703 }
704 }
705 }
706 }
707 }
708 }
709 }
710 }
711 }
712 }
713 }
714 }
715 }
716 }
717 }
718 }
719 }
720 }
721 }
722 }
723 }
724 }
725 }
726 }
727 }
728 }
729 }
730 }
731 }
732 }
733 }
734 }
735 }
736 }
737 }
738 }
739 }
740 }
741 }
742 }
743 }
744 }
745 }
746 }
747 }
748 }
749 }
750 }
751 }
752 }
753 }
754 }
755 }
756 }
757 }
758 }
759 }
760 }
761 }
762 }
763 }
764 }
765 }
766 }
767 }
768 }
769 }
770 }
771 }
772 }
773 }
774 }
775 }
776 }
777 }
778 }
779 }
780 }
781 }
782 }
783 }
784 }
785 }
786 }
787 }
788 }
789 }
790 }
791 }
792 }
793 }
794 }
795 }
796 }
797 }
798 }
799 }
800 }
801 }
802 }
803 }
804 }
805 }
806 }
807 }
808 }
809 }
810 }
811 }
812 }
813 }
814 }
815 }
816 }
817 }
818 }
819 }
820 }
821 }
822 }
823 }
824 }
825 }
826 }
827 }
828 }
829 }
830 }
831 }
832 }
833 }
834 }
835 }
836 }
837 }
838 }
839 }
840 }
841 }
842 }
843 }
844 }
845 }
846 }
847 }
848 }
849 }
850 }
851 }
852 }
853 }
854 }
855 }
856 }
857 }
858 }
859 }
860 }
861 }
862 }
863 }
864 }
865 }
866 }
867 }
868 }
869 }
870 }
871 }
872 }
873 }
874 }
875 }
876 }
877 }
878 }
879 }
880 }
881 }
882 }
883 }
884 }
885 }
886 }
887 }
888 }
889 }
890 }
891 }
892 }
893 }
894 }
895 }
896 }
897 }
898 }
899 }
900 }
901 }
902 }
903 }
904 }
905 }
906 }
907 }
908 }
909 }
910 }
911 }
912 }
913 }
914 }
915 }
916 }
917 }
918 }
919 }
920 }
921 }
922 }
923 }
924 }
925 }
926 }
927 }
928 }
929 }
930 }
931 }
932 }
933 }
934 }
935 }
936 }
937 }
938 }
939 }
940 }
941 }
942 }
943 }
944 }
945 }
946 }
947 }
948 }
949 }
950 }
951 }
952 }
953 }
954 }
955 }
956 }
957 }
958 }
959 }
960 }
961 }
962 }
963 }
964 }
965 }
966 }
967 }
968 }
969 }
970 }
971 }
972 }
973 }
974 }
975 }
976 }
977 }
978 }
979 }
980 }
981 }
982 }
983 }
984 }
985 }
986 }
987 }
988 }
989 }
990 }
991 }
992 }
993 }
994 }
995 }
996 }
997 }
998 }
999 }
1000 }

```

Obr. 3.7 Výpis hlavní části smyčky v main() část 4.

```

236         for (j=0; j< NMEAS; j++) {
237             adcval += read_ADC();
238             HAL_Delay(1);
239         }
240
241         //nastavit L a cekat
242         HAL_GPIO_WritePin(LED_GAIN_GPIO_Port, LED_GAIN_Pin, GPIO_PIN_RESET);
243         HAL_Delay(TPER2);
244         //mereni
245         for (j=0; j< NMEAS; j++) {
246             adcval -= read_ADC();
247             HAL_Delay(1);
248         }
249
250         //akumulace
251         acc += adcval;
252     }
253
254     //vysledek
255     printf("A*%d = %d\n", NPER*NMEAS, acc);
256
257 }
258     break;
259
260 default:
261     printf("error\n");
262     break;
263
264 }
265 }
266 }

```

Obr. 3.8 Výpis hlavní části smyčky v main() část 5.

4. ZÁVĚR

Cílem práce bylo srovnání vlastností lavinových fotodiod a polovodičových fotonásobičů pro detekci slabých optických pulsů s délkou hrany v řádu nanosekund a návržení rozhraní pro detektor optických pulsů, kde jsme se zaměřili na minimalizaci vlastního šumu detektoru. Pro rozhraní detektoru optických pulsů je navržen předzesilovač a regulovaný zdroj napájecího napětí. Pro nastavení optimálních podmínek fotodetektoru zdrojem byla použita experimentální funkce pro automatické korigování napětí pomocí měření zisku, která je ovládána přes mikrokontroler. Alternativně je možné pro nastavení napětí použít trimr.

Jako fotodetektor byla zvolena konstrukce s lavinovou fotodiodou pro její citlivost a elektrickou šířku pásma. Porovnání fotodetektoru (PIN, APD, PM) je v Tabulka 1.

Pro návržení vhodného předzesilovače byla provedena rešerše v Tabulka 3 různých typů zesilovačů a srovnání jejich hlavních parametrů. Ve všech parametrech vyniká zesilovač BGA729N6, avšak kvůli jeho rozměrům nebylo možné tento zesilovač použít. Proto se využil běžně dostupnější typ zesilovače, a to MAX2650EUS+T, který dosahuje horších parametrů, ale pro laboratorní měření je dostačující.

Obvody byly navrženy včetně softwaru pro mikrokontroler, avšak při ožívování na desce plošných spojů APD se našla chyba. Došlo k nechtěnému propojení přes net label v programu EAGLE. Z důvodů opatření proti COVIDu byla experimentální část práce zpožděna a uvedenou chybu již nebylo do odevzdání práce možné opravit. Proto nebylo provedeno experimentální ověření.

LITERATURA

- [1] MAŤÁTKO, Jan. *Elektronika*. 6. vyd., V Idea servis 5., dopl. a upr. vyd. Praha: Idea servis, 2008. ISBN 978-80-85970-64-7.
- [2] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika: [učebnice]*. České Budějovice: KOPP, 2004. ISBN 80-7232-241-9.
- [3] F. Acerbi, G. Paternoster, A. Gola, V. Regazzoni, N. Zorzi and C. Piemonte, "High-Density Silicon Photomultipliers: Performance and Linearity Evaluation for High Efficiency and Dynamic-Range Applications," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 1-7, April 2018, Art no. 4700107, doi: 10.1109/JQE.2018.2802542.
- [4] PERKINELMER, Inc. *Avalanche photodiode: A User Guide* [online]. 2010, 5 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: https://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-6538APP_AvalanchePhotodiodesUsersGuide.pdf
- [5] P. Eckert et al., "Characterisation studies of silicon photomultipliers," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 620, 217–226 (2010).
- [6] HUI, Rongqing a Maurice S. O'SULLIVAN. *Fiber optic measurement techniques*. Burlington: Academic Press, c2009. ISBN 978-0-12-373865-3.
- [7] LI, Richard C. *RF Circuit Design, 2nd edition*. United States: John Wiley, 2012. ISBN 9781118128497.
- [8] Hamamatsu Optosemiconductor Handbook, Chapter 3: Si APD, MPPC
- [9] Svět IT [online]. 2011 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <http://2.bp.blogspot.com/-dyFoohNv3eQ/TvC09qYxixI/AAAAAAAAABSw/N9cv-Qfeqdg/s1600/V-A+charakteristika+fotodiody+diody.jpg>
- [10] ROHM, BA17805FP-E2 [online], [cit.2021-05-26]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1747296.pdf>
- [11] Maxim Integrated Products, MAX2650EUS-T [online],2003, [cit.2021-05-26]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/256/MAX2650-1515556.pdf>
- [12] Mini-Circuits, MAR-8ASM+ [online], [cit.2021-05-26]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/1030/MAR_8ASM_2b-1699752.pdf

- [13] Analog Devices, ADL5535 [online], [cit.2021-05-26]. Dostupné z:
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5535.pdf>
- [14] Analog Devices, ADL5530 [online], [cit.2021-05-26]. Dostupné z:
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5530.pdf>
- [15] NXP, BGA3018 [online], 2013, [cit.2021-05-26]. Dostupné z:
<https://cz.mouser.com/datasheet/2/302/BGA3018-1126088.pdf>
- [16] infineon, BGA729N6 [online], 2015, [cit.2021-05-26]. Dostupné z:
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BGA729N6-DS-v03_00-EN.pdf?fileId=5546d46254e133b401552f3e23ae69c3
- [17] Mini-Circuits, LHA-13LN+ [online], [cit.2021-05-26]. Dostupné z:
<https://cz.mouser.com/datasheet/2/302/BGA3018-1126088.pdf>

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - DESKA ZDROJE A MIKROPROCESORU	39
A.1 SEZNAM SOUČÁSTEK K 1. ČÁSTI	39
A.2 SEZNAM SOUČÁSTEK K 2. ČÁSTI	40
A.3 SCHÉMA ZAPOJENÍ V PROGRAMU EAGLE ČÁST 1.	41
A.4 SCHÉMA ZAPOJENÍ V PROGRAMU EAGLE ČÁST 2.	42
PŘÍLOHA B - DESKA APD A PŘEDZESILOVAČE	43
B.1 SEZNAM SOUČÁSTEK	43
B.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ V PROGRAMU EAGLE.....	44
PŘÍLOHA C - NÁVRHY DPS.....	45
C.1 NÁVRH DPS ZDROJ A MIKROPROCESOR HORNÍ STRANA	45
C.2 NÁVRH DPS ZDROJ A MIKROPROCESOR DOLNÍ STRANA	45
C.3 NÁVRH DPS APD A PŘEDZESILOVAČ HORNÍ STRANA	46
C.4 NÁVRH DPS APD A PŘEDZESILOVAČ DOLNÍ STRANA.....	46

Příloha A - Deska zdroje a mikroprocesoru

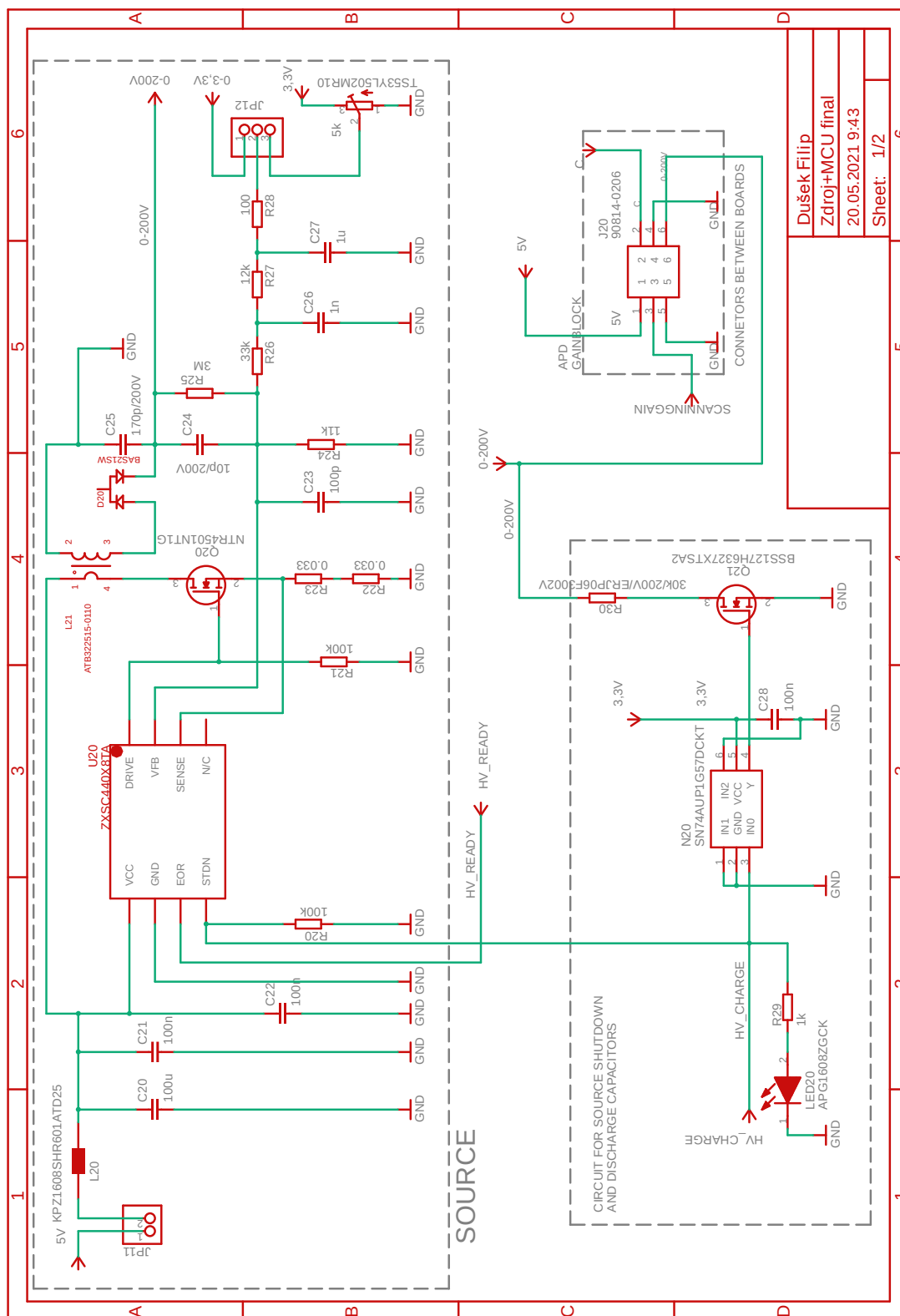
A.1 Seznam součástek k 1. části

Seznam použitých součástek			
Název schématu:	Zdroj + MCU 1/2		
Označení ve schématu	Hodnota	Název	Typ
J20	-	Konektor	90814-0206
L20	-	Feritová perlička	KPZ1608SHR601ATD25
L21	-	Trafo	ATB322515-0110
U20	-	Spínací regulátor	ZXSC440X8TA
N20	-	Logické hradlo	SN74AUP1G57DCK
Q20	-	MOSFET tranzistor	NTR4501NT1G
Q21	-	MOSFET tranzistor	BSS127H6327XTSA2
D20	-	Vysokonapěťové spínací diody	BAS21SW
LED 20	-	LED dioda	APG1608ZGCK
C20	100 μ F	Kondenzátor	C0805
C21,C22,C28	100 nF	Kondenzátor	C0805
C23	100 pF	Kondenzátor	C0805
C24	10 pF / 200 V	Kondenzátor	C0805
C25	170 nF / 200 V	Kondenzátor	C0805
C26	1 nF	Kondenzátor	C0805
C27	1 μ F	Kondenzátor	C0805
R20,R21	100 k Ω	Odpor	R0805
R22,R23	0,033 Ω	Odpor	R0805
R24	11 k Ω	Odpor	R0805
R25	3 M Ω	Odpor	R0805
R26	33 k Ω	Odpor	R0805
R27	12 k Ω	Odpor	R0805
R28	100 Ω	Odpor	R0805
R29	1 k Ω	Odpor	R0805
R30	30k/200V	Čipový rezistor	30k/200V/ERJP06F3002V
Trimr	5k	Trimr	TS53YL502MR10
JP11	-	Jumper	10129378-906001BLF
JP12	-	Jumper	10129378-906001BLF

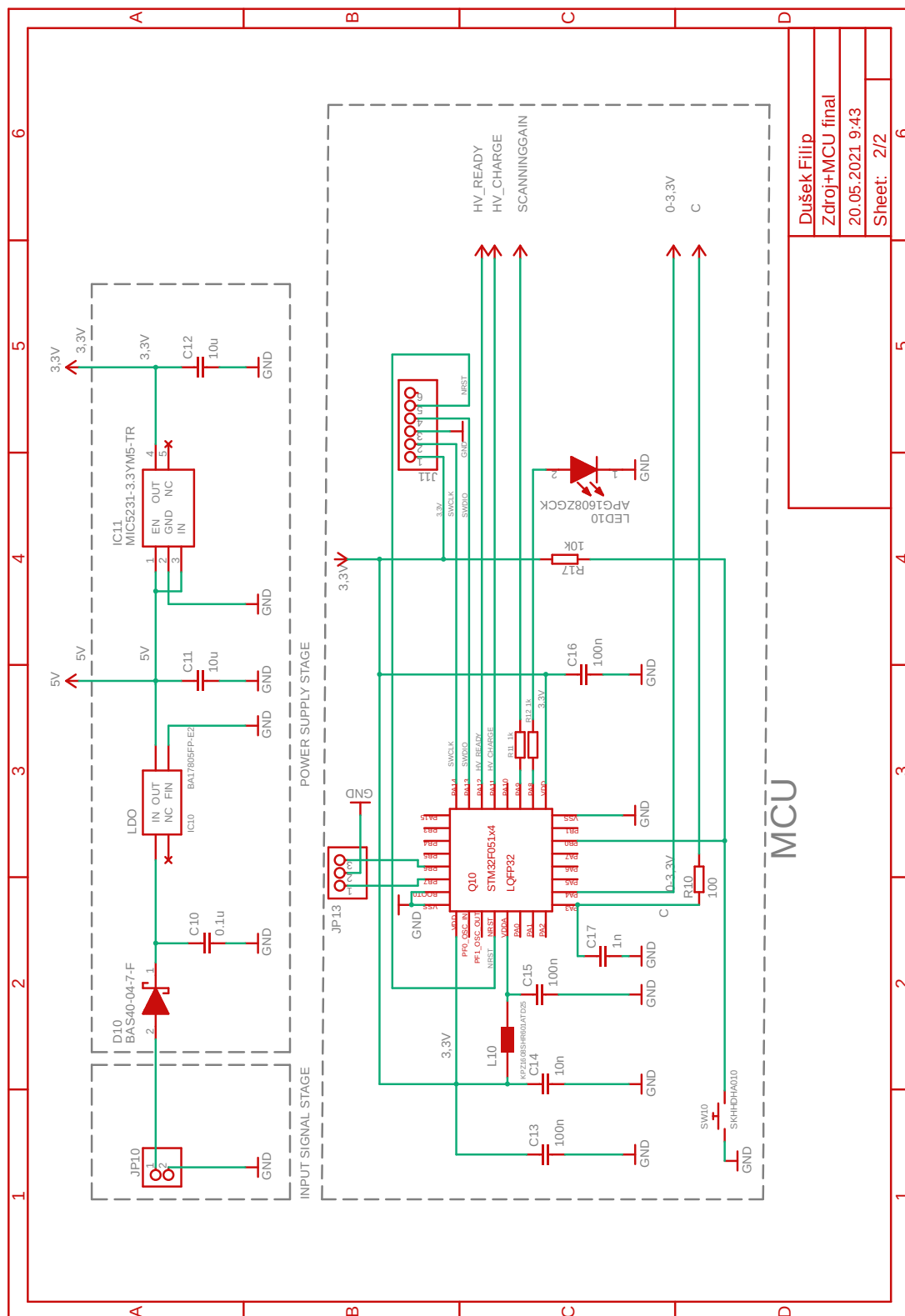
A.2 Seznam součástek k 2. části

Seznam použitých součástek			
Název schématu:	Zdroj + MCU 2/2		
Označení ve schématu	Hodnota	Název	Typ
JP10	-	Konektor	10129378-906001BL F
J11	-	Konektor	2355182-6
IC10	-	LDO	BA17805FP-2
IC11	-	LDO	MIC5231-3,3YM5-TR
Q10	-	Mikrokontroler	STM32F051x4
L10	-	Feritová perlička	KPZ1608SHR601ATD25
SW10	-	Tlačítko	SKHHDH A010
D10	-	Schottkyho dioda	BAS40-04-7-F
LED10	-	LED dioda	APG1608ZGCK
C10	0,1 μ F	Kondenzátor	C0805
C11,C12	10 μ F	Kondenzátor	C0805
C13,C15,C16	100 nF	Kondenzátor	C0805
C14	10 nF	Kondenzátor	C0805
C17	1 nF	Kondenzátor	C0805
R10	100 Ω	Odpor	R0805
R11,R12	1 k Ω	Odpor	R0805
R13	10 k Ω	Odpor	R0805
JP13	-	Jumper	10129378-906001BL F

A.3 Schéma zapojení v programu Eagle část 1.



A.4 Schéma zapojení v programu Eagle část 2.

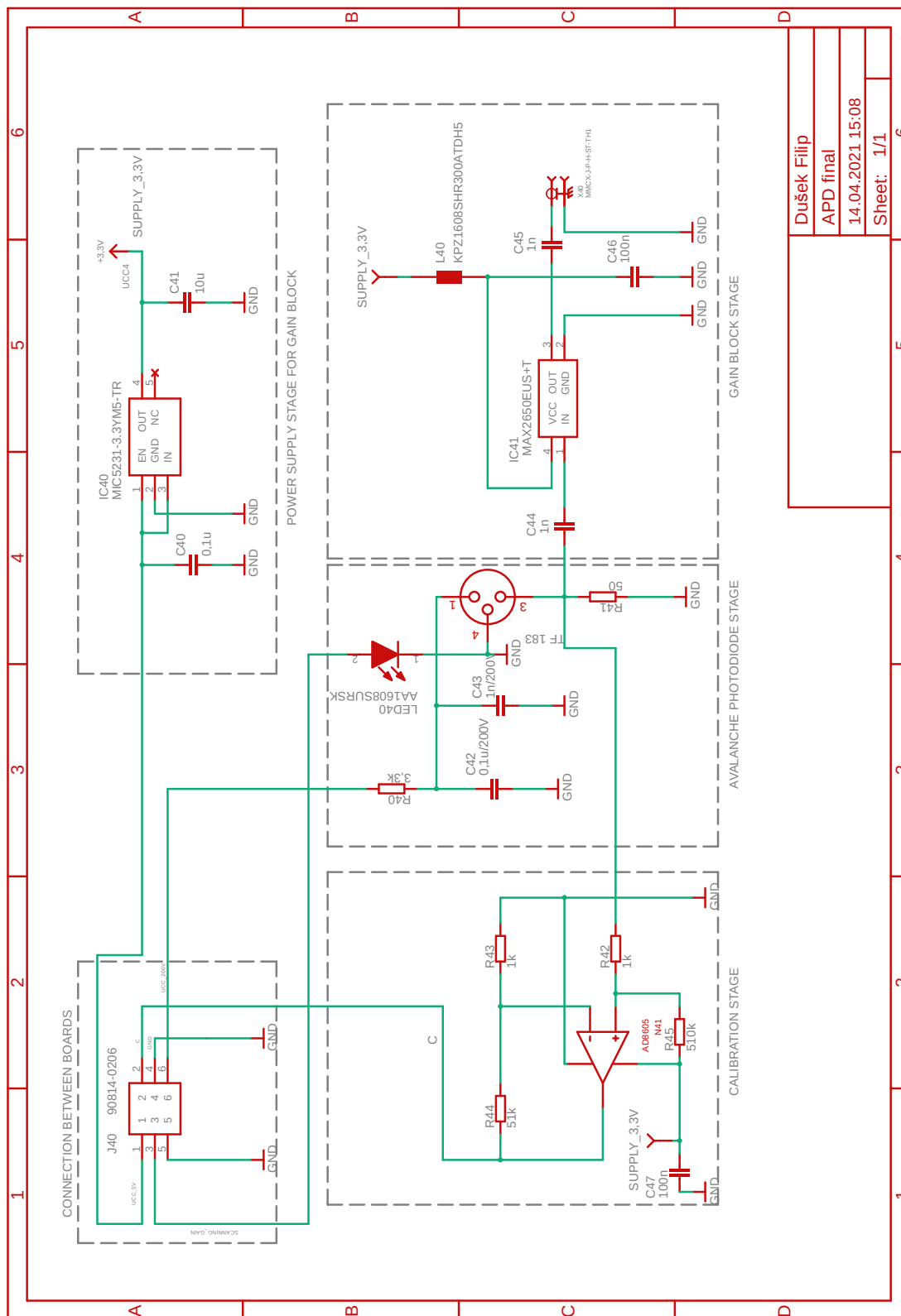


Příloha B - Deska APD a předzesilovače

B.1 Seznam součástek

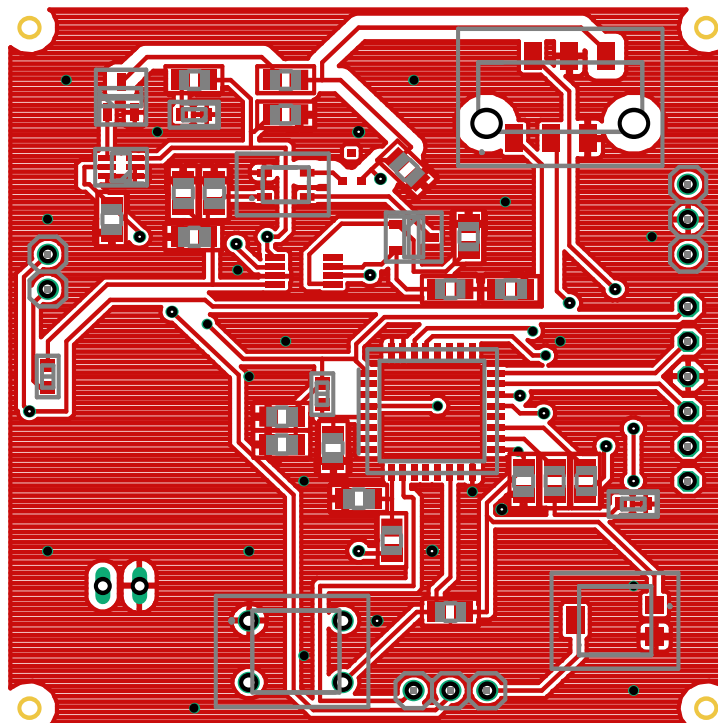
Seznam použitých součástek			
Název schématu:	APD a předzesilovač		
Označení ve schématu	Hodnota	Název	Typ
J40	-	Konektor	90814-0206
IC40	-	LDO	MIC5231-3,3YM5-TR
N41	-	Operační zesilovač	AD8605
IC42	-	Vysokofrekvenční zesilovač	MAX2650EUS+T+
L40	-	Feritová perlička	KPZ1608SHR300ATDH5
X40	-	Koaxiální konektor	MMCX-J-P-H-ST-TH1
C40	0,1 μ F	Kondenzátor	C0805
C42	0,1 μ F/200V	Kondenzátor	C0805
C41	10 μ F	Kondenzátor	C0805
C43	1nF/200V	Kondenzátor	C0805
C44,C45	1 nF	Kondenzátor	C0805
C46,C47	100 nF	Kondenzátor	C0805
R40	3,3 k Ω	Odpor	R0603
R41	50 Ω	Odpor	R0603
R42,R43	1 k Ω	Odpor	R0603
R44	51 k Ω	Odpor	R0603
R45	510 k Ω	Odpor	R0603
TF 183	-	PA TICE	-
LED40	-	LED dioda	AA1608SURSK

B.2 Schéma zapojení v programu Eagle

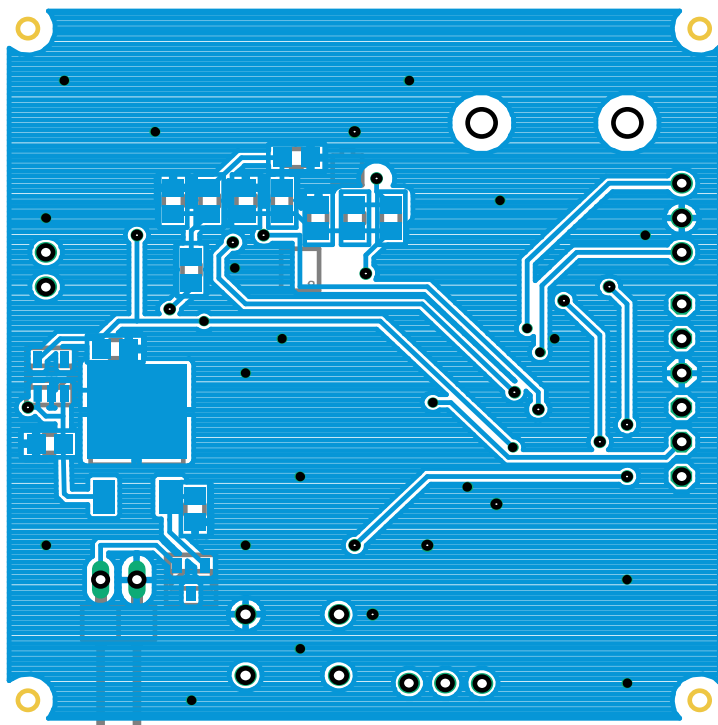


Příloha C - Návrhy DPS

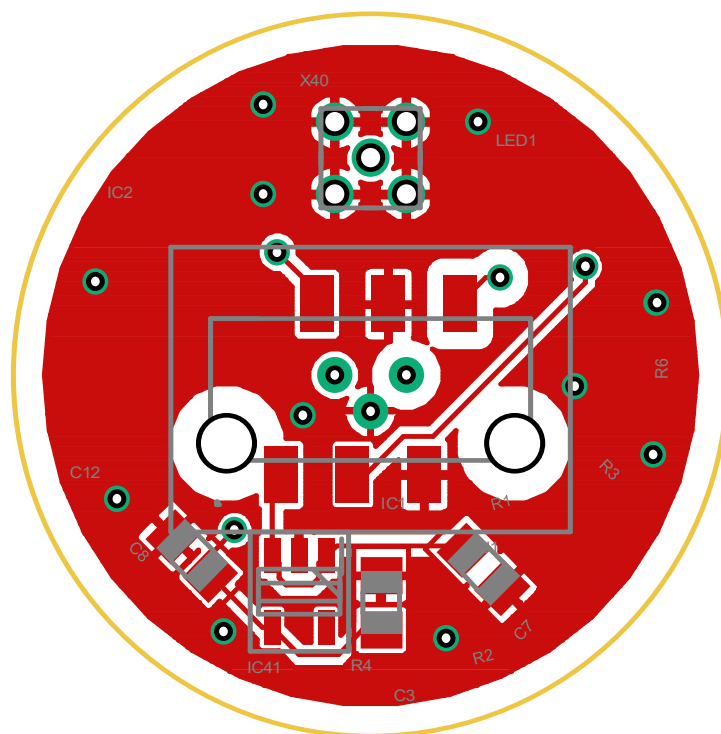
C.1 Návrh DPS Zdroj a mikroprocesor horní strana



C.2 Návrh DPS Zdroj a mikroprocesor dolní strana



C.3 Návrh DPS APD a předzesilovač horní strana



C.4 Návrh DPS APD a předzesilovač dolní strana

